

**ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ
И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ОБУВНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ:
ГРУППА КРУПНОТОННАЖНЫХ ПОЛИМЕРОВ ***

**POLYMER MATERIALS FOR 3D PRINTING
AND THE POSSIBILITY OF THEIR USE IN SHOE PRODUCTION
GROUP OF LARGE-TONNAGE POLYMERS**

*О.Б. КОНОВАЛОВА, В.В. МИНЕЦ, Е.С. БОКОВА, В.В. КОСТЫЛЕВА, О.А. БЕЛИЦКАЯ
O.B. KONOVALOVA, V.V. MINETS, E.S. BOKOVA, V.V. KOSTYLEVA, O.A. BELITSKAYA*

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: o.b.konovalova@gmail.com; vvminets@yandex.ru; esbokova@ya.ru;
kostyleva.vv@mail.ru; belitskaya-oa@rguk.ru

Любое современное производство невозможно без применения инновационных технологий, к которым относится технология 3D-печати. Причины такого широкого использования объясняются доступностью метода; его пригодностью для мелкосерийного производства; малым количеством отходов; энергоэффективностью; экологичностью; возможностью автоматизации; высокой воспроизводимостью формы; непрерывностью производственных процессов; высокой степенью персонализации изделий а также возможностью их проектирования в цифровом виде.

В статье представлен анализ основных методов 3D-печати и обзор инновационных полимерных материалов, включая биоразлагаемые, применяемых в аддитивном производстве.

Any modern production is impossible without the use of innovative technologies, which include 3D printing technology.

The reasons for such widespread use are explained by the availability of the method. 3d printing is suitable for small-scale production and gives a small amount of waste. Additive manufacturing is characterized by energy efficiency; environmental friendliness; the possibility of automation; high reproducibility of the form; continuity of production processes; a high degree of personalization of products; as well as the possibility of their design in digital form.

The article presents an analysis of the main methods of 3D printing and an overview of innovative polymer materials, including biodegradable ones, used in additive manufacturing.

Ключевые слова: 3D-печать, полимеры, полимерные композиции, биоразлагаемые полимеры, принтеры, наполнители, добавки, обувь.

Keywords: 3D printing, polymers, polymer compositions, biodegradable polymers, printers, fillers, additives, footwear.

* Работа выполняется при финансовой поддержке РФФИ: проект 20-38-90047\20.

1. Введение

Трехмерная 3D-печать, или "аддитивное производство" – это процесс создания цельных трехмерных объектов геометрической формы по моделям компьютерного дизайна путем последовательного нанесения материальных слоев, повторяющих контуры будущего изделия [1], [2].

Фактически, 3D-печать, запатентованная в 1986 году Чарльзом У. Халлом, одним из основателей корпорации 3D Systems, полная противоположность таких традиционных методов механического производства и обработки, как фрезеровка, резка, сверление, шлифование, и составила серьезную конкуренцию "субтрактивному производству", где формирование облика изделия происходит за счет удаления лишнего материала [3].

Если в 1990-х годах метод 3D-печати использовался, главным образом, для создания функциональных или визуальных прототипов (быстрое прототипирование (англ. Rapid Prototyping)), то в настоящее время он все больше применим для распределенного быстрого производства в архитектуре, строительстве, промышленном дизайне, автомобильной, аэрокосмической, военно-промышленной, инженерной и медицинской отраслях, биоинженерии, пищевой промышленности, производстве ювелирных изделий, модной одежды и обуви [4].

Причины такого широкого использования объясняются доступностью метода; его пригодностью для мелкосерийного производства; малым количеством отходов; энергоэффективностью; экологичностью; возможностью автоматизации; высокой воспроизводимостью формы; непрерывностью производственных процессов; высокой степенью персонализации изделий; а также возможностью их проектирования в цифровом виде [5].

Последнее играет решающую роль при изготовлении инклюзивной продукции обувного назначения (ортопедические колдовки, профилактические стельки и др.), относящейся к технологически сложному штучному производству, с одной стороны, требующему индивидуального подхода к каждому конкретному потребителю, а с

другой, возможностью создания модели за счет 3D-сканирования – автоматического сбора и анализа данных реального объекта, а именно формы стопы, ее антропометрических характеристик, с последующим преобразованием в цифровую трехмерную модель.

В ходе печати принтер считывает 3D-печатный файл (как правило, в формате STL), содержащий данные трехмерной модели [6], и наносит последовательные слои жидкого, порошкообразного, листового или ниточного, как правило, полимерного материала, выстраивая трехмерную модель из серии поперечных сечений [7]. Эти слои, соответствующие виртуальным поперечным сечениям в CAD-модели, соединяются или сплавляются вместе для создания объекта заданной формы.

Построение модели с использованием современных технологий занимает от нескольких часов до нескольких дней, в зависимости от используемого метода, а также размера и сложности модели [8]. Традиционные производственные методы, например, литья под давлением, могут обходиться дешевле при производстве крупных партий изделий, но аддитивные технологии обладают преимуществами при мелкосерийном производстве, позволяя достигнуть более высокого темпа производства и гибкости дизайна, наряду с повышенной экономичностью в пересчете на единицу произведенного товара [9]. Кроме того, настольные 3D-принтеры позволяют дизайнерам и разработчикам создавать концептуальные модели и прототипы, не выходя из офиса.

2. Материалы и методы

Исходя из привлекательности 3D-печати, для создания изделий по индивидуальному заказу, актуальным является вопрос обеспечения требуемого баланса между возможной структурной сложностью объекта проектирования, скоростью его изготовления и доступной для потребителя ценой [10]. Решение этих вопросов во многом зависит от выбора метода 3D-печати, а также расходных материалов [11].

В настоящее время доступен широкий спектр методов 3D-печати. Основные раз-

личия заключаются в способе нанесения слоев и используемом сырье [12]. Ряд технологий основывается на размягчении или полном плавлении материалов для создания слоев. Сюда входит выборочное лазерное спекание (SLS); выборочная лазерная плавка (SLM); метод послойного наплавления (FDM, или FFF); струйная трехмерная печать (PolyJet); цифровая светодиодная проекция (DLP); производство твердых изделий методом фотополимеризации, известное как стереолитография (SLA); технология ламинирования листовых материалов (КОМ), при которой тонкие слои материала подвергаются резке до необходимого контура, с последующим соединением в единое целое и др. [13].

Исходным сырьем для технологий 3D-печати может быть металл, полимеры, бумага, гипс [14]. Остановимся подробно на тех методах 3D-печати, использование которых предполагает применение полимерного сырья [15].

Из всех перечисленных методов 3D-печати наиболее коммерчески доступными, дешевыми и распространенными являются методы послойного наплавления (FDM или FFF), разработанные С. Скоттом Трампом в конце 1980-х гг., а также методы спекания порошковых материалов [16].

Согласно методам послойного наплавления, изделие формируется экструзией расплава полимера в форму определенной конфигурации, с последующей фиксацией структуры изделия охлаждением расплава [17]. Экструдер приводится в движение пошаговыми двигателями или сервомоторами, обеспечивающими позиционирование печатной головки в трех плоскостях [18]. Перемещение экструдера контролируется производственным программным обеспечением, привязанным к микроконтроллеру [19].

В методах выборочного теплового или лазерного спекания порошкообразное сырье послойно подвергается воздействию горячего пресса или лазера, вплоть до получения цельной модели. Этот метод появился примерно в то же время, что и SLA, и имеет с ним много общего, только вместо жидко-

сти используется порошкообразный полимер с диаметром частиц 50...100 мкм, который распределяется в горизонтальной плоскости тонкими равномерными слоями [20].

Метод цифровой проекции (DLP) предполагает использование жидких полимерных смол, в которые добавлены специальные реагенты-отвердители, чувствительные к ультрафиолету, излучаемому цифровыми проекторами в рабочей камере печатного устройства [21]. После отверждения каждого элементарного слоя материала рабочая платформа погружается на глубину, равную толщине одного слоя, и жидкий полимер вновь облучается. Процедура повторяется до завершения постройки модели.

В технологии струйной печати PolyJet жидкий полимер распыляется на рабочую платформу, где каждый слой облучается ультрафиолетовым пучком до получения готового изделия [22]. В результате получается модель, готовая к немедленному использованию. В данной технологии предусмотрено дополнительное применение гелеобразного "опорного" водорастворимого полимера, используемого для создания геометрически сложных моделей с полыми элементами, которые получают путем удаления "опорного" элемента из готового изделия методом промывки. Данная технология, в отличие от предыдущих, предусматривает использование не только термопластичных полимеров, но и эластомеров, что дает возможность получения гибких изделий.

Чрезвычайно интересным методом 3D-печати, сопряженным с программами 3D-сканирования, является метод проекционной стереолитографии (SLA), где полимеризация осуществляется с помощью светодиодных проекторов [23]. Этот метод подразумевает разделение цифровой трехмерной модели на горизонтальные слои с преобразованием каждого слоя в двухмерную проекцию, аналогичную фотошаблону. Двухмерные изображения проецируются на последовательные слои фотополимерной смолы, затвердевающие в соответствии с проецируемыми контурами. В некоторых системах проекторы расположены снизу, способствуя выравниванию поверхности

фотополимерного материала при вертикальном движении модели (в данном случае рабочая платформа с нанесенными слоями передвигается вверх, а не погружается в материал) и сокращению производственного цикла до минут вместо часов. Технология позволяет создавать модели со слоями из нескольких материалов с разной скоростью застывания [24].

В качестве расходных материалов для FDM или FFF методов используют термопластичные полимеры, такие как тройной сополимер акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (АБС пластик, англ. ABS), поликарбонат (ПК, англ. PC), полилактид (ПЛА, англ. PLA), полиэтилен низкого давления (ПЭНД, англ. HDPE), смеси поликарбоната и ABS-пластика, полифениленсульфон (ПФС, англ. PPSU) и др. [25].

В методе послойного спекания – полиамид (ПА, англ. PA), полиамид, армированный стекловолокном (англ. PA-GF), полистирол (ПС, англ. PS) и другие полимеры, к которым добавляется фотоотвердитель [26].

Рассмотрим некоторые достоинства и недостатки полимерных материалов для 3D-печати, а также новые тенденции в области их модификации [27].

Самым распространенным полимером для 3D-принтеров, в том числе для изготов-

ления каблуков и платформ обуви, является АБС-пластик. Точность изготовления моделей из АБС-пластика достигает 50 микрон (0,05 мм). Технология хороша для индивидуального изготовления обуви, создания коллекций эксклюзивной обуви, а также разработки сезонных коллекций в массовом производстве. Такая популярность сополимера связана с его доступностью, невысокой себестоимостью (от 1500 до 2000 руб. за кг), нетоксичностью, влаго- и маслостойкостью, стойкостью к щелочам и кислотам, высокой прочностью, широким диапазоном эксплуатационных температур: от -40 °С до +90 °С (у модифицированных марок до 103...113 °С), хорошей формоустойчивостью, растворимостью в ацетоне, кетонах, эфирах (что позволяет не только склеивать детали из АБС, но и сглаживать с помощью растворителей неровную поверхность) [28].

К недостаткам относится довольно высокая температура печати, порядка 210...270 °С; неустойчивость к ультрафиолетовому излучению, высокая термусадка; запах при работе с нитью и необходимость предварительного прогрева рабочего стола, примерно до 110 градусов, во избежание прилипания материала к его поверхности [29].



Рис. 1

Вторым, не менее популярным, полимером для 3D-печати является полилактид PLA – биоразлагаемый, биосовместимый полиэфир, для которого мономером служит молочная кислота, получаемая из природного сырья, например, кукурузы или сахарного тростника (рис. 1 – пример 3D-печати

коллекции обуви из биоразлагаемого полимера (архив кафедры художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи, автор Минец В.В.).

К достоинствам полимера, помимо способности к биоразложению и экологической чистоты, относится низкий коэффици-

ент трения; малая термоусадка, особенно в сравнении с АБС; меньшая хрупкость, чем у АБС (при одинаковых нагрузках изделие из ПЛА скорее согнется, чем сломается); более низкая температура переработки чем у АБС (около 180...190 °С), и меньшая температура подогрева рабочего стола (до 50...60°С), отсутствие посторонних запахов при работе с полимером. Недостатками является меньшая долговечность, высокая гигроскопичность, более высокая себестоимость, чем у АБС пластика, растворимость в сильно токсичных растворителях, таких как дихлорэтан, хлороформ или других хлорированных углеводородах [30].

Менее распространенным полимером является ударопрочный полистирол (ПС, англ. HIPS (High-impact Polystyren)) – непрозрачный, жесткий, твердый материал, стойкий к ударным воздействиям, к перепадам температур, растворимый в естественных растворителях, таких как лимонная кислота, и поэтому используемый, в том числе, для создания "опорных" структур. Рабочая температура ПС около 230°С, цена на 30...50% выше, чем у АБС пластика [31].

Еще одним полимером, который находит широкое применение для производства "опорных" вспомогательных деталей, является водорастворимый поливиниловый спирт (ГТВС, англ. PVA), который требует рабочей температуры около 180...200°С (дальнейшее ее повышение нежелательно из-за возможности пиролиза – термического разложения). Кроме того, материал очень гигроскопичен, активно поглощает влагу из воздуха, что создает проблемы при хранении и печати, особенно, если диаметр нити 1,75 мм [32].

Для печати деталей с низким поверхностным трением часто используют полиамид (ПА, англ. PA) – легкий, гибкий, эластичный, прочный, устойчивый к химическому воздействию полимер с температурой плавления порядка 240...250°С. Недостатком полимера является его высокая гигроскопичность и стоимость, превосходящая более чем в два раза стоимость АБС и ПЛА [33].

К биологически инертным полимерам, используемым для 3D-печати, можно отнести поликарбонат (ПК, англ. PC) – твердый

полимер, сохраняющий свои свойства в диапазоне температур от - 40 до 120°С. Помимо того, что ПК является самым прочным пластиком для 3D-принтеров, он чрезвычайно долговечен и устойчив к физическим воздействиям и нагреву. Нить для 3D-принтера из ПК гигроскопична, способна впитывать воду из воздуха, поэтому ее необходимо хранить в сухом месте. Температура печати (плавления полимера) составляет порядка 270...310°С, температура стола – 90...110°С; усадка или деформация – значительные; растворимость низкая. Благодаря своим физическим свойствам поликарбонат является идеальным сырьем для 3D-печати деталей, которые должны сохранять свою прочность, ударную вязкость и форму в условиях длительной эксплуатации [34].

Похожими эксплуатационными свойствами обладает полиэтилентерефталат (ПЭТФ, англ. PEET). Модели из него получаются очень прочными, поскольку слои расплавленного материала обладают высокой адгезией. Рабочая температура переработки 210...225°С, стола – до 50...80°С. Цена около 4500...5000 руб. за килограмм [35].

Если полиэтилентерефталат модифицирован гликолем (ПЭТФГ, англ. PETG), то он более устойчив, менее хрупок и более легок в применении, чем основная форма полимера. По этой причине ПЭТФГ считается хорошим компромиссом между АБС и ПЛА, двумя наиболее часто используемыми пластиками для 3D-принтеров. Полиэтилентерефталат, модифицированный гликолем, более эластичен и долговечен, чем ПЛА, и более простой в печати, чем АБС. При использовании ПЭТФГ необходимо помнить о двух недостатках полимера – высокой гигроскопичности и низкой устойчивости изделий к механическим царапинам [36].

Особое место в технологиях 3D-печати занимают термопластичные эластомеры (ТПЭ) – широкий класс сополимеров (и полимерных смесей), доступных для 3D-принтеров. Мягкие и растяжимые, эти нити могут выдержать нагрузку, которую не могут выдержать ни АБС, ни ПЛА. С другой

стороны, печать не всегда проста, поскольку для этого требуется особенная конструкция экструдера 3D-принтера [37].

Разновидность ТПЭ представляет термопластичный полиуретан (ТПУ, англ. TPU). По сравнению с другими термопластичными эластомерами, он немного жестче, что облегчает печать, но более долговечен и может лучше сохранять свою эластичность при пониженных температурах. Температура печати ТПУ составляет 210...230°C; температура стола – 30...60°C; усадка или деформация – минимальные. Использование ТПЭ или ТПУ необходимо при создании объектов, которые подвергаются сильному износу, должны сопротивляться многократным изгибам, растягиваться или сжиматься [38].

3. Результаты и обсуждения

Внедрение методов 3D-моделирования, призванных повысить качество жизни граждан, обеспечить конкурентоспособность России, развить экономическую, социально-политическую, культурную и духовную сферы жизни общества, совершенствовать систему государственного управления на основе использования информационных и телекоммуникационных технологий, отвечает Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации.

ВЫВОДЫ

В работе проведен анализ современных методов 3D-печати, с точки зрения реализуемой в них технологии и применяемых расходных материалов.

Подробно рассмотрены методы 3D-печати, предусматривающие использование полимерного сырья.

Приведены основные марки полимеров и композиций на их основе с точки зрения основных, прежде всего, температурных параметров переработки методом 3D-печати, а также преимуществ и недостатков того или иного полимера, степени их экологичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bandyopadhyay A., T.P. Gualtieri and S. Bose. 2015. Global Engineering and Additive Manufacturing.*

In S. Bose (Ed.), *Additive Manufacturing*: 1-18. CRC Press.

2. *Алибекова М.И., Костылева В.В., Новиков А.Н., Фирсов А.В. Современные технологии в проектировании обуви // Дизайн и технологии. – 2017, №57(99). С.31...35.*

3. *Слюсар В. Фаббер-технологии. Новое средство трехмерного моделирования. Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 5/2003.*

4. *Baumers, M., P. Dickens, C. Tuck and R. Hague. 2016. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. Technological Forecasting and Social Change 102: 193-201.*

5. *Гусева М.А., Костылева В.В., Петросова И.А., Андреева Е.Г., Лутвин Е.В., Гусев И.Д. Цифровизация в инклюзивной антропометрии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020, №6. С. 154...161.*

6. *Bharadwaj, S.A., Bharadwaj and E. Bendoly. 2007. The performance effects of complementarities between information systems, marketing, manufacturing, and supply chain processes. Information Systems Research. – 18(4): 437-453.*

7. *Cao, Q. and S. Dowlatshahi. 2005. The impact of alignment between virtual enterprise and information technology on business performance in an agile manufacturing environment // Journal of Operations Management. – 23(5): 531-550.*

8. *D'Aveni R. 2015. The 3-D Printing Revolution. Harvard Business Review. – 93(3): 41-48.*

9. *Chiva, R. and J. Alegre. 2009. Investment in design and firm performance: The mediating role of design management. Journal of Product Innovation Management –26(4): 424-440.*

10. *De Jong, J.P. and E. de Bruijn. 2013. Innovation lessons from 3-D printing. MIT Sloan Management Review. – 54(2): 42-52.*

11. *Eisenhardt, K.M. and B.N. Tabrizi. 1995. Accelerating adaptive processes. Product innovation in the global computer industry. Administrative Science Quarterly. – 40(1): 84-110.*

12. *Fernández P., Del Rio L., Varela J. and Bande B. 2010. Relationships among functional units and new product performance: The moderating effect of technological turbulence. Technovation. – 30(6), 310-321.*

13. *Mauerhoefer T., S. Strese and M. Brettel. 2017. The impact of information technology on New Product Development performance // Journal of Product Innovation Management.*

14. *Mellor S., L. Hao and D. Zhang. 2014. Additive manufacturing: A framework for implementation. International // Journal of Production Economics. – 149: 194-201.*

15. *F. Xu, Y.S. Wong and H.T. Loh. Toward Generic Models for Comparative Evaluation and Process Selection in Rapid Prototyping and Manufacturing // Journal of Manufacturing Systems. – 2000. Vol. 19, № 5, P.283...296.*

16. *Todd Grim and Associates. Fused Deposition Modelling Technology Evaluation”, Time-Compression Technologies. – Vol. 2. № 3. 2003. P. 1...6.*

17. Anitha R., Arunachalam S. and P. Radhakrishnan. Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modeling // Journal of Material Processing Technology. – Vol. 118. 2001. P.385...388.
18. Galantucci L.M., Lavecchia F. and Percoco G. Study of Compression Properties of Topologically Optimized FDM Made Structured Parts // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – Vol. 57. 2008. P.243...246.
19. Pulak M. Pandey, N. Venkata Reddy and Sanjay G. Dhande. Improvement of Surface Finish by Staircase Machining in Fused Deposition Modeling // Journal of Material Processing Technology. – Vol.132. 2003. P.323...331.
20. Celine Bellehumeur, Longmei Li, Qian Sun and Peihua Gu. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modelling Process // Journal of Manufacturing Process. – Vol. 6. 2004. №2. P. 170....178.
21. Nikita Nikitinsky, Tamara Sokolova, Ekaterina Pshehotskaya. DLP Technologies: Challenges and Future Directions, Conference: The International Conference on Cyber-Crime Investigation and Cyber Security (ICCICS2014) At: Asia Pacific University of Technology and Innovation (APU), Malaysia, November 2014.
22. Tee Yun Lu, Chenxi Peng, Philip Pille, Martin Leary. PolyJet 3D Printing of Composite Materials: Experimental and Modelling Approach, JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society, January 2020.
23. Kalpakjian S.; Schmid S.R. Manufacturing Engineering Technology; Dorling Kindersley Pvt Ltd.; Pearson Educ.: London, UK, 2009.
24. Ingole D.S.; Kuthe A.M.; Thakare S.B.; Talankar A.S. Rapid prototyping—a technology transfer approach for development of rapid tooling. Rapid Prototyp. J. – 2009, 15, 280–290.
25. Youssef A.; Hollister S.J.; Dalton P.D. Additive manufacturing of polymer melts for implantable medical devices and scaolds. Biofabrication. – 2017, 9, 12002.
26. Evans B. Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing; Apress: New York, NY, USA, 2012; ISBN 1430243937.
27. Ligon S.C.; Liska R.; Stampfl J.; Gurr, M.; Mülhaupt R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. Chem. Rev. – 2017, 117, 10212–10290.
28. Jacobs P.F. Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography; Society of Manufacturing Engineers: Dearborn, MI, USA, 1992; ISBN 0872634256.
29. Ferreira J.C.; Mateus A. A numerical and experimental study of fracture in RP stereolithography patterns and ceramic shells for investment casting. J. Mater. Process. Technol. – 2003, 134, 135–144.
30. Wohlers T.T.; Carey T. Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report; Wohlers Associates Fort Collins: Fort Collins, CO, USA, 2014; ISBN 0991333209.
31. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen, K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Compos. Part B Eng. 2018, 143, 172–196.
32. Rooks B. Rapid tooling for casting prototypes. Assem. Autom. – 2002, 22, 40–45.
33. Mahindru D.V., Mahendru P., Mahindru V., Mahendru P. Review of Rapid Prototyping-Technology for the Future. Glob. J. Comput. Sci. Technol. – 2013, 13, 27–38.
34. Melnikova R.; Ehrmann A.; Finsterbusch K. 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Bristol, UK, 2014; Volume: 62, p. 012018.
35. Hafsa M.N., Ibrahim M., Wahab M.S., Zahid M.S. Evaluation of FDM pattern with ABS and PLA material. Appl. Mech. Mater. – 2014, 465–466, 55–59.
36. Choudhari C.M., Patil V.D. Product Development and its Comparative Analysis by SLA, SLS and FDM Rapid Prototyping Processes. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; IOP Publishing: Bristol, UK, 2016; Volume: 149.
37. Harun W.S.W., Safian S., Idris M.H. Evaluation of ABS patterns produced from FDM for investment casting process. WIT Trans. Eng. Sci. – 2009, 64, 319–328.
38. Chhabra M., Singh R. Rapid casting solutions: A review. Rapid Prototyp. J. – 2011, 17, 328–350.

REFERENCES

- Bandyopadhyay A., T.P. Gualtieri and S. Bose. 2015. Global Engineering and Additive Manufacturing. In S. Bose (Ed.), Additive Manufacturing: 1-18. CRC Press.
- Alibekova M.I., Kostyleva V.V., Novikov A.N., Firsov A.V. Modern technologies in footwear design // Design and technologies. - 2017, No. 57(99). P.31...35.
- Slusar V. Fabber technologies. New 3D modeling tool. Electronics: Science, Technology, Business, 5/2003.
- Baumers, M., P. Dickens, C. Tuck and R. Hague. 2016. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. Technological Forecasting and Social Change 102: 193-201.
- Guseva M.A., Kostyleva V.V., Petrosova I.A., Andreeva E.G., Litvin E.V., Gusev ID. Digitalization in inclusive anthropometry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. - 2020, No. 6. pp. 154...161.
- Bharadwaj, S.A., Bharadwaj and E. Bendoly. 2007. The performance effects of complementarities between information systems, marketing, manufacturing, and supply chain processes. Information Systems Research.– 18(4): 437-453.
- Cao, Q. and S. Dowlatshahi. 2005. The impact of alignment between virtual enterprise and information technology on business performance in an agile manufacturing environment // Journal of Operations Management. – 23(5): 531-550.
- D'Aveni R. 2015. The 3-D Printing Revolution. Harvard Business Review. – 93(3): 41-48.
- Chiva, R. and J. Alegre. 2009. Investment in design and firm performance: The mediating role of design management. Journal of Product Innovation Management –26(4): 424-440.
- De Jong, J.P. and E. de Bruijn. 2013. Innovation lessons from 3-D printing. MIT Sloan Management Review. – 54(2): 42-52.
- Eisenhardt, K.M. and B.N. Tabrizi. 1995. Accelerating adaptive processes. Product innovation in the

global computer industry. *Administrative Science Quarterly*. – 40(1): 84-110.

12. Fernández P., Del Rio L., Varela J. and Bande B. 2010. Relationships among functional units and new product performance: The moderating effect of technological turbulence. *Technovation*. – 30(6), 310-321.

13. Mauerhoefer T., S. Strese and M. Brettel. 2017. The impact of information technology on New Product Development performance // *Journal of Product Innovation Management*.

14. Mellor S., L. Hao and D. Zhang. 2014. Additive manufacturing: A framework for implementation. *International // Journal of Production Economics*. – 149: 194-201.

15. F. Xu, Y.S. Wong and H.T. Loh. Toward Generic Models for Comparative Evaluation and Process Selection in Rapid Prototyping and Manufacturing // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2000. Vol. 19, № 5, P.283...296.

16. Todd Grim and Associates. "Fused Deposition Modelling Technology Evaluation", *Time-Compression Technologies*. – Vol. 2. № 3. 2003. P. 1...6.

17. Anitha R., Arunachalam S. and P. Radhakrishnan. Critical Parameters Influencing the Quality of Prototypes in Fused Deposition Modeling // *Journal of Material Processing Technology*. – Vol. 118. 2001. P.385...388.

18. Galantucci L.M., Lavecchia F. and Percoco G. Study of Compression Properties of Topologically Optimized FDM Made Structured Parts // *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. – Vol. 57. 2008. P.243...246.

19. Pulak M. Pandey, N. Venkata Reddy and Sanjay G. Dhande. Improvement of Surface Finish by Staircase Machining in Fused Deposition Modeling // *Journal of Material Processing Technology*. – Vol.132. 2003. P.323...331.

20. Céline Bellehumeur, Longmei Li, Qian Sun and Peihua Gu. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modelling Process // *Journal of Manufacturing Process*. – Vol. 6. 2004. №2. P. 170....178.

21. Nikita Nikitinsky, Tamara Sokolova, Ekaterina Pshehotskaya. DLP Technologies: Challenges and Future Directions, Conference: The International Conference on Cyber-Crime Investigation and Cyber Security (ICCICS2014) At: Asia Pacific University of Technology and Innovation (APU), Malaysia, November 2014.

22. Tee Yun Lu, Chenxi Peng, Philip Pille, Martin Leary. PolyJet 3D Printing of Composite Materials: Experimental and Modelling Approach, *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, January 2020.

23. Kalpakjian S.; Schmid S.R. *Manufacturing Engineering Technology*; Dorling Kindersley Pvt Ltd.; Pearson Educ.: London, UK, 2009.

24. Ingole D.S.; Kuthe A.M.; Thakare S.B.; Talankar A.S. Rapid prototyping—a technology transfer approach for development of rapid tooling. *Rapid Prototyp. J.* – 2009, 15, 280–290.

25. Youssef A.; Hollister S.J.; Dalton P.D. Additive manufacturing of polymer melts for implantable medical devices and scaolds. *Biofabrication*. – 2017, 9, 12002.

26. Evans B. *Practical 3D Printers: The Science and Art of 3D Printing*; Apress: New York, NY, USA, 2012; ISBN 1430243937.

27. Ligon S.C.; Liska R.; Stampfl J.; Gurr, M.; Mülhaupt R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chem. Rev.* – 2017, 117, 10212–10290.

28. Jacobs P.F. *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of Stereolithography*; Society of Manufacturing Engineers: Dearborn, MI, USA, 1992; ISBN 0872634256.

29. Ferreira J.C.; Mateus A. A numerical and experimental study of fracture in RP stereolithography patterns and ceramic shells for investment casting. *J. Mater. Process. Technol.* – 2003, 134, 135–144.

30. Wohlers T.T.; Carey T. *Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*; Wohlers Associates Fort Collins: Fort Collins, CO, USA, 2014; ISBN 0991333209.

31. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen, K.T.Q., Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos. Part B Eng.* 2018, 143, 172–196.

32. Rooks B. Rapid tooling for casting prototypes. *Assem. Autom.* – 2002, 22, 40–45.

33. Mahindru D.V., Mahendru P., Mahindru V., Mahendru P. Review of Rapid Prototyping-Technology for the Future. *Glob. J. Comput. Sci. Tech-nol.* – 2013, 13, 27–38.

34. Melnikova R.; Ehrmann A.; Finsterbusch K. 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with diherent polymer materials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2014; Volume: 62, p. 012018.

35. Hafsa M.N., Ibrahim M., Wahab M.S., Zahid M.S. Evaluation of FDM pattern with ABS and PLA material. *Appl. Mech. Mater.* – 2014, 465–466, 55–59.

36. Choudhari C.M., Patil V.D. Product Development and its Comparative Analysis by SLA, SLS and FDM Rapid Prototyping Processes. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2016; Volume: 149.

37. Harun W.S.W., Safian S., Idris M.H. Evaluation of ABS patterns produced from FDM for investment casting process. *WIT Trans. Eng. Sci.* – 2009, 64, 319–328.

38. Chhabra M., Singh R. Rapid casting solutions: A review. *Rapid Prototyp. J.* – 2011, 17, 328–350.

Статья опубликована по материалам Косыгинского форума. Поступила 20.09.21.