

Техническая информация

DOI: 10.32864/polymmattech-2019-5-3-85-90

УДК 678.8:666.3:004

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ СВЯЗУЮЩИХ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Г. А. ДЕМИДОВ¹, А. Н. КАРАНДАШЕВ¹, Е. В. ШАЛОБАЕВ², Ф. А. ПЕРЕПЕЛИЦА², С. В. ШИЛЬКО³⁺, В. Е. СТАРЖИНСКИЙ³, В. В. ДУБРОВСКИЙ³

¹Международный научно-образовательный центр «Балтико-ЛВМ-Политехник» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29АФ, Научно-исследовательский корпус, 195251, г. Санкт-Петербург, Россия

²Международный научно-образовательный центр «Autodesk» Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ул. Гастелло, д. 12, ауд. 208, 196135, г. Санкт-Петербург, Россия

³Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

Рассмотрены возможности расширения сферы использования аддитивных технологий в части использования новых расходных материалов в виде керамики. Описан опыт создания российского «керамического» 3D-принтера «Engineer V2-K», а также программного обеспечения, учитывающего особенности расходного материала на основе нитридов и карбидов с полимерными связующими, разработанного при сотрудничестве российских и белорусских специалистов. Представлены результаты 3D-печати керамических изделий различной степени сложности с использованием шихтовых составов из бескислородных соединений (нитрида кремния и карбида кремния) и разработанных авторами связующих в виде смеси полимерных материалов с функциональными добавками, позволяющими улучшить технологические свойства, например, повысить текучесть расплава при формировании изделий. Проведенные экспресс-исследования напечатанных образцов показали сопоставимость параметров микроструктуры и механических свойств с аналогичными показателями изделий, изготовленных традиционными способами.

Показана применимость указанного 3D-принтера и предложенных расходных материалов в аддитивных технологиях взамен традиционных методов порошковой металлургии или шликерного литья, в частности, с целью изготовления пресс-форм при решении технологических задач быстрого прототипирования и мелкосерийного производства. Указаны направления дальнейших исследований по оптимизации состава и расширению перечня механических испытаний расходных материалов.

Ключевые слова: аддитивные технологии, керамический 3D-принтер, карбид кремния, нитрид кремния, полимерные связующие материалы.

APPLICATION OF POLYMERIC BINDERS AT MANUFACTURING CERAMIC PRODUCTS BY ADDITIVE TECHNOLOGY METHODS

G. A. DEMIDOV¹, A. N. KARANDASHEV¹, E. V. SHALOBAYEV², F. A. PEREPELITSA², S. V. SHIL'KO³⁺, V. E. STARZHINSKIY³, V. V. DUBROVSKIY³

¹International Science and Educational Center "Center of Excellence "Baltic-LVM-Polytechnic" of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya St., 29AF, SPbPU Research Building, 195251, St. Petersburg, Russia

²International Science and Educational Center "Autodesk" of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Gastello St., 12, r. 208, 196135, St. Petersburg, Russia

³V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Science of Belarus, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

The possibilities of expanding the use of additive technologies in terms of the use of new consumables in

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: shilko_mpri@mail.ru

the form of ceramics are considered. The experience of creating the Russian “ceramic” 3D printer “Engineer V2-K” is described, as well as software that takes into account the features of consumables based on nitrides and carbides with polymer binders, developed in collaboration with Russian and Belarusian specialists. The results of 3D printing of ceramic products of varying degrees of complexity using batch compositions of oxygen-free compounds (silicon nitride and silicon carbide) and binders developed in the form of a mixture of polymer materials with functional additives to improve technological properties, for example, increase the melt flow during the formation of products are presented. The rapid studies of printed samples showed the comparability of the parameters of the microstructure and mechanical properties with similar parameters of products made by traditional methods.

The applicability of the indicated 3D printer and the proposed consumables in additive technologies is shown instead of the traditional methods of powder metallurgy or slip casting, in particular, for the purpose of manufacturing molds for solving technological problems of rapid prototyping and small-scale production. The directions of further research on optimizing the composition and expanding the list of mechanical tests of consumables are indicated.

Keywords: additive technologies, ceramic 3D printer, silicon carbide, silicon nitride, polymer binder materials.

Введение

Аддитивные технологии (АТ) во многом определяют формируемую в настоящее время цифровую экономику нового природоподобного технологического уклада [1–4]. Существенные сдвиги в отечественной науке и технике произошли после введения в действие стандартов ГОСТ Р 57558 (ISO / ASTM 52900). «Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения», который зафиксировал АТ, как научно-техническое направление, устранив небольшой разрыв с международными и другими национальными нормативными документами.

Коллектив специалистов МНОЦ «Балтико-ЛВМ-Политехник» Санкт-Петербургского Политехнического Университета Петра Великого многие годы проводит исследования по созданию отечественных аппаратных средств для дальнейшего развития АТ (фирма «3D-эксперт», «Политех-Инжиниринг»).

С 2016 года к ним присоединились ученые из Национального исследовательского Университета ИТМО (г. Санкт-Петербург) и Института механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси (ИММС НАН Беларуси, г. Гомель), которые с 2005 г. в рамках Договора о сотрудничестве начали инициативную работу по поиску технологий, обеспечивающих быстрое и экономичное прототипирование, недостижимое в дорогостоящих металлических формах [5]. В начале 21-го века 3D-принтеры реализовали возможности лишь быстрого прототипирования (Rapid Prototyping) на основе бумажных моделей, склеиваемых из ламинированных слоев бумаги [6], по т. н. LOM-технологии. В ходе развития микросистемной техники [7] появились фотополимерные методы и стереолитография, а затем 3D-печать в современном виде, которая позволила решить ранее поставленные задачи быстрого прототипирования в индивидуальном и мелкосерийном (т. н. непоточном) производстве [8].

Университет ИТМО и ИММС НАН Беларуси специализируются на других составляющих отечественного 3D-принтинга, включая создание про-

граммного обеспечения (ПО) и расходных материалов, а также связанных с этими разработками механизмов и элементов конструкций принтера [9–17]. В качестве базового оборудования специалисты Университет ИТМО и ИММС НАН Беларуси стали использовать 3D-принтер «Engineer V2», выпускаемый МНОЦ «Балтико-ЛВМ-Политехник», (рис. 1), с целью его совершенствования и создания новых отечественных разработок в соответствии с государственной программой импортозамещения. В результате был создан 3D-принтер «Engineer V2-M» с переходом от слайсеров группы «Repetier» к слайсеру «Simplify-3D» и использованием в качестве расходного импортного полимерного материала *PET-G/PC*.

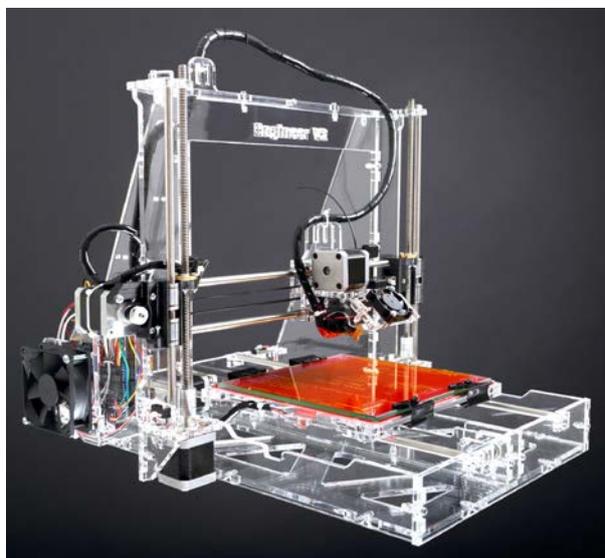


Рисунок 1 — 3D-принтер «Engineer V2-K»
Fig. 1 — 3D printer "Engineer V2-K"

Кроме того, университет ИТМО проводит обучение и повышение квалификации преподавателей, ведущих подготовку операторов для работы на 3D-принтерах на предприятиях Санкт-Петербурга.

Цель работы — создание отечественных расходных реакционно-спеченных керамических материалов для 3D-печати.

Разработка материалов, оборудования и технологии аддитивного формования заготовок изделий на основе реакционно-спеченного карбида кремния и нитрида кремния обусловлена необходимостью расширения номенклатуры выпускаемых изделий; изготовления сложно-профильных изделий, затруднительного по классической технологии формования; уменьшения стоимости и сроков производства единичных и мелкосерийных партий продукции.

Материалы и методы исследования

Учитывая фактор изменения физико-механических свойств расходного материала в процессе изготовления изделий методами 3D-печати, определяли его деформационно-прочностные характеристики по ГОСТ Р 56785 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов». Исследовали также влияние настроек различных программ-слайсеров, определяющих объем и форму заполнения материала, что отражено в работах [18–23]. В частности, пришлось заменить ранее применяемые слайсеры, поскольку они слабо учитывали зависимости физико-механических характеристик материала от диаметра экструдерной головки. Одновременно решали вопрос ускорения печати изделий в режиме быстрого прототипирования. Так, при быстром прототипировании время печати составило 1,5 ч, а при медленной печати — полный рабочий день. Конечно, качество печати при медленном процессе и меньшем диаметре экструдерной головки выше, но для быстрого прототипирования важна сама возможность реализации конструкции. Проведена модернизация аппаратных средств и изготовлен «керамический» 3D-принтер «Engineer V2-K» (рис. 1).

Результаты и их обсуждение

В инициативном порядке выполнены предпроектные работы по оценке возможности изготовления изделий их керамических материалов, в частности, карбида и нитрида кремния методами аддитивных технологий на 3D-принтере собственного изготовления, в том числе:

- определены возможности изготовления керамических изделий различной степени сложности с использованием 3D-печати из специально подготовленных шихтовых составов на основе бескислородных соединений (нитрид кремния и карбид кремния), с применением разработанных авторами полимерных связующих (представляют собой смесь полимерных материалов с порошком кремния и добавками, которые усиливают нужные свойства, например, текучесть) для «горячего» формования заготовок;

- разработана технология и изготовлен опытный образец 3D-принтера (технология FDM) с использованием многоступенчатого регулируемого подогрева и пневматической подачи шихты для «го-

рячей» послойной печати пробных изделий сложной геометрической формы;

- получены пробные образцы изделий сложной формы, обработанные по традиционной керамической технологии (азотирование, отжиг, силицирование и т. п.).

Проведенные нашими партнерами (ООО «Вириал», г. Санкт-Петербург и ОНПП «Технология», г. Обнинск) экспресс-исследования микроструктуры напечатанных образцов показали сопоставимость их параметров с качественными характеристиками изделий, изготовленных традиционными способами. Это позволяет сделать вывод, что разработанное оборудование и расходные материалы являются перспективными для промышленного изготовления изделий сложной геометрической формы из конструкционной и функциональной керамики с полимерным связующим, в том числе и для изделий специального назначения.

Микроструктурные исследования показали (рис. 2), что образцы из карбида кремния, изготовленные по технологии порошковой металлургии, содержат 20% свободного кремния, а по аддитивной технологии — 21%.

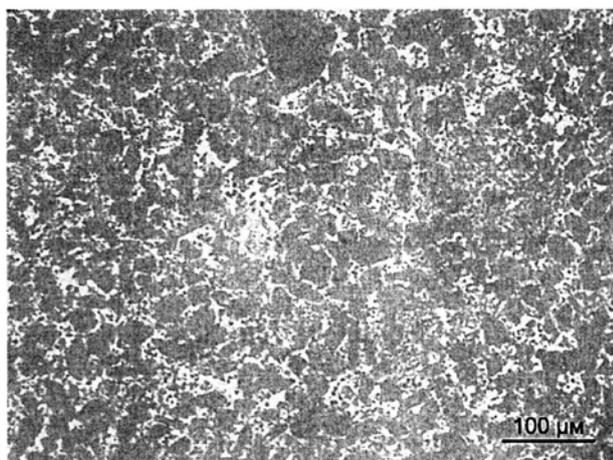
Установлена идентичность фазового состава образцов на основе нитрида кремния, полученных с помощью аддитивных технологий и технологии шликерного литья (ТШЛ). Плотность образцов, выполненных по АТ, составляет 98% от плотности образцов по ТШЛ.

Авторы считают выбранное направление перспективным и для эффективного продолжения начатых разработок ведут поиск «индустриального» партнера, что позволит сократить сроки разработки и изготовления опытного, а затем и промышленного образца отечественного керамического 3D-принтера, ориентированного на использование достаточно широкого перечня отечественных материалов с требуемыми свойствами.

Кроме того, планируется проведение дополнительных механических испытаний образцов получаемых керамических материалов по ГОСТ Р 577497 (ИСО 17138) «Композиты керамические. Метод испытания на изгиб при нормальной температуре» и ГОСТ Р 57605 (ИСО 14544) «Композиты керамические. Метод испытания на сжатие при повышенной температуре».

Разработанный керамический принтер предлагается использовать для изготовления прессформ при решении технологических задач быстрого прототипирования и мелкосерийного производства [16,18] в сотрудничестве с НИИ перспективных материалов Северо-Западного научного центра концерна «Алмаз-Антей», призванным координировать рассматриваемые разработки в России, а также институтами НАН Беларуси, работающими по программам создания отечественных комплексов для рассматриваемых технологий. Таким образом, будет решен вопрос, стоящий на повестке дня уже более 20 лет [5].

«Классический» процесс производства



3D-печать

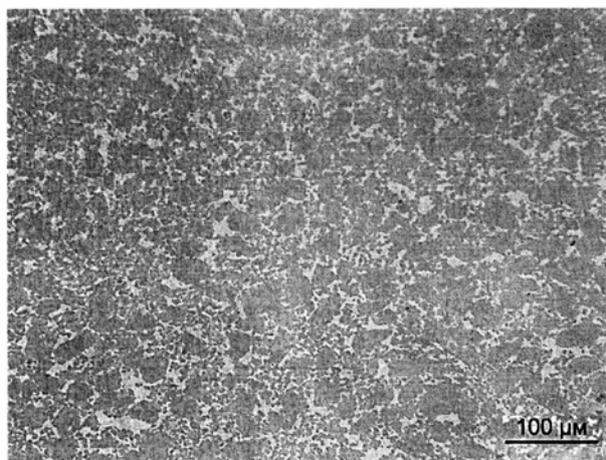


Рисунок 2 — Микроструктура образцов из карбида кремния, полученных с использованием технологии порошковой металлургии и АТ
 Fig. 2 — Microstructure of silicon carbide samples obtained using powder metallurgy technology and AT

Выводы

Установлено близкое соответствие основных структурных и механических характеристик материала изделий из нитрида и карбида кремния, изготовленных методами АТ и по традиционным технологиям порошковой металлургии и шликерного литья.

Показана пригодность высокомолекулярных веществ в качестве связующих керамических расходных материалов, что мотивирует проведение дополнительных исследований по оптимизации их состава.

Необходимы также дальнейшие работы по совершенствованию программного обеспечения в виде программ-слайсеров, в которых были бы учтены особенности новых материалов и конструкции 3D-принтеров.

Целесообразно применение методов аддитивных технологий для изготовления керамических форм для изделий из полимерных материалов методом литья под давлением при быстром прототипировании изделий, и возможно, в условиях их серийного производства.

В связи с вышеизложенным необходимы контакты с широким кругом разработчиков материалов для АТ и промышленными производителями изделий из них. Целесообразно взаимодействие с недавно организованным НИИ перспективных материалов Северо-Западного научного центра концерна «Алмаз-Антей», призванным координировать рассматриваемые разработки в России, а также с институтами НАН Беларуси, работающими по программам создания отечественных комплексов для реализации рассматриваемых технологий как основы современных цифровых производств.

Обозначения

АТ — аддитивные технологии; ТШЛ — технология шликерного литья.

Литература

1. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С. Природоподобные технологии — новые возможности и новые угрозы // Индекс безопасности. 2016. Т. 22, № 3–4 (118–119). С. 103–108.
2. Дорошенко В. С. О природоподобных технологиях для точного литья // Литейщик России. 2018. № 2. С. 22–28.
3. Полатайко С. В., Львов А. А. Философия и "природоподобный подход" в науке // Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук. 2018. Т. 12, № 4. С. 86–89.
4. Шилько С. В., Рябенко Т. В., Панин С. В., Шалобаев Е. В. 3D-печать как «природоподобный» способ производства оптимизированных эндоскопов // Доклады IV Всероссийского научного семинара с международным участием «Междисциплинарные проблемы аддитивных технологий», 29–31 октября 2018, Томск. Томск: НТИУ, 2019. С. 94–99.
5. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В. Проектирование прессформ для точных пластмассовых колес с использованием технологии быстрого прототипирования // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении. Н. Новгород, Арзамас: НГТУ: АПИ, 2005. С. 28–29.
6. Шалобаев Е. В. Микросистемная техника и мехатроника: особенности соотношения микро и макроуровней // Микросистемная техника. 2000. № 4. С. 3.
7. Белановская И. Д., Цветкова К. Е., Осадчий Ю. С. К вопросу выбора технологического оборудования непоточного производства // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 1–3. С. 524–527.
8. Соболева А. А., Перепелица Ф. А., Шалобаев Е. В. Быстрое прототипирование средствами аддитивных технологий // Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО. СПб., 2017. Т. 4. С. 210–212.
9. Белослудцев Е. В., Демидов Г. А., Шалобаев Е. В., Дубровский В. В. Разработка промышленного 3D-принтера для изготовления элементов конструкций, оптимальных по весу, прочности и стоимости // Сборник докладов Международного научно-практического симпозиума «Перспективы развития аддитивных технологий в Республике Беларусь», Минск, 24–26 мая 2017. Минск, 2017. С. 9–17.
10. Старжинский В. Е., Краузе В., Гаврилова О. В., Кудин А. Т., Симеонов С. Пластмассовые зубчатые колёса в передачах точного приборостроения. Минск: Навука і тэхніка, 1993. 307 с.
11. Старжинский В. Е., Тимофеев Б. П., Шалобаев Е. В., Кудин А. Т. Пластмассовые зубчатые колёса в механизмах приборов. СПб.; Гомель: ИММС НАН Б, 1998. 528 с.
12. Старжинский В. Е. Зубчатые передачи // Справочник по технологии изделий из пластмасс / под ред. Г. В. Сагалаева, В. В. Абрамова, В. Н. Кулезнева, С. В. Власова. СПб: Химия, 2001. С. 124–156.

13. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В., Шилько С. В., Анто-нюк В. Е., Басинюк В. Л., Благодарный В. М., Гольдфарб В. И., Капелевич А. Л., Мардосевич Е. И., Тимофеев Б. П., Ткачев А. А. Элементы привода приборов: расчет, конструирование, технологии / под ред. Ю. М. Плескачевского. Минск: Беларуская навука, 2012. 769 с.
14. Красноруцкая Н. С., Флеров А. В., Шалобаев Е. В. Проблема-тика 3D-печати // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб., 2016. Т. 3. С. 9–11.
15. Шалобаев Е. В., Перепелица Ф. А., Красноруцкая Н. С. Ад-дитивные технологии в машиностроении // Сборник матери-алов XII Международной научно-технической конференции: «Приборостроение в XXI веке-2016. Интеграция науки, об-разования и производства», Ижевск, 23–25 ноября 2016 г. Ижевск, 2017. С. 319–323.
16. Перепелица Ф. А., Шалобаев Е. В., Шилько С. В. Отече-ственное программное обеспечение для аддитивных техно-логий // Сборник докладов Международного научно-пра-ктического симпозиума «Перспективы развития адди-тивных технологий в Республике Беларусь», Минск, 24–26 мая 2017. Минск, 2017. С. 128–135.
17. Шилько С. В., Рябченко Т. В., Гавриленко С. Л., Шалоба-ев Е. В. Применение компьютерной механики при подготовке САД моделей для 3D-печати градиентных материалов и изделий // Сборник докладов Международного научно-пра-ктического симпозиума «Перспективы развития адди-тивных технологий в Республике Беларусь», Минск, 24–26 мая 2017. Минск, 2017. С. 194–206.
18. Шалобаев Е. В., Гавриленко С. Л., Перепелица Ф. А., Красноруцкая Н. С., Демидов Г. А. Исследования свойств пластмасс, используемых в аддитивных техно-логиях, в зависимости от программ-слайсеров // Тезисы докладов Международной конференции «Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2017)», Гомель, 27–30 июня 2017. Гомель, 2017. С. 205–206.
19. Старжинский В. Е., Шилько С. В., Шалобаев Е. В. Техноло-гия производства зубчатых колес из термопластичных по-лимерных материалов (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2018. Т. 4, № 2. С. 6–31.
20. Сенчило М. А., Перепелица Ф. А. Анализ программного обеспечения для обработки результатов лазерного сканирования и 3D-моделирования // Современные науч-ные исследования и разработки. 2018. Т. 2, № 12(29). С. 838–841.
21. Зяблицева Е. В., Перепелица Ф. А. Технологии 3D-моделирования ювелирных изделий // Современное образо-вание: традиции и инновации. 2017, № 1. С. 196–198.
22. Полякова Д. А., Сокурченко Ю. А. Анализ зарубежных и оте-чественных исследований проблемы адаптации 3D-моделей для 3D-печати // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб., 2018. Т. 7. С. 249–252.
23. Довыденко Е. М., Иванова Н. А., Чижик С. А., Агабе-ков В. Е. Определение параметров 3D-печати отечественны-ми прутками из композиционных полимерных материалов на основе АБС пластиков // Полимерные материалы и техно-логии. 2018. № 2. С. 85–90.
- method of optimized endoprostheses fabrication]. *Doklady IV Vserossiyskogo nauchnogo seminaru s mezhdunarodnym uchastiem «Mezhdis-tsiplinarnye problemy additivnykh tekhnologiy»* [Reports of the IV All-Russian Scientific Seminar with Interna-tional Participation “Interdisciplinary Problems of Additive Technologies”]. Tomsk, 2019, pp. 94–99.
5. Starzhinskiy V. E., Shalobaev E. V. Proektirovanie pressform dlya tochnykh plastmassovykh koles s ispol'zovaniem tekhnologii bystrogo prototipirovaniya [Mold design for precision plastic wheels using rapid prototyping technology]. *Progressivnye tekhnologii v mashino- i priborostroenii* [Advanced technologies in machine and instrument engineering]. N. Novgorod; Arzamas: NGTU Publ.: API Publ., 2005, pp. 28–29.
6. Shalobaev E. V. Mikrosistemnaya tekhnika i mekhatronika: oso-bennosti sootnosheniya mikro i makrourovney [Microsystem technology and mechatronics: features of the ratio of micro- and macrolevels]. *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem technolo-gy], 2000, no. 4, pp. 3.
7. Belanovskaya I. D., Tsvetkova K. E., Osadchiy Yu. S. K voprosu vybora tekhnologicheskogo oborudovaniya neprotchnogo pro-izvodstva [To the question of the choice of technological equip-ment of continuous production]. *Izvestiya Samarskogo nauch-nogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, vol. 13, no. 1–3, pp. 524–527.
8. Soboleva A. A., Perepelitsa F. A., Shalobaev E. V. Bystroe prototipirovanie sredstvami additivnykh tekhnologii [Rapid prototyping using additive technology]. *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh universiteta ITMO* [Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University]. Saint-Petersburg, 2017, vol. 4, pp. 210–212.
9. Belosludtsev E. V., Demidov G. A., Shalobaev E. V., Dubrov-skiy V. V. Razrabotka promyshlennogo 3D-printera dlya iz-gotovleniya elementov konstruktсий, optimal'nykh po vesu, prochnosti i stoimosti [Development of an industrial 3D printer for the manufacture of structural elements that are optimal in weight, strength and cost]. *Sbornik докладов Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma «Perspektivy razvitiya ad-ditivnykh tekhnologii v Respublike Belarus'»* [Collection of re-ports of the International scientific and practical symposium "Prospects for the development of additive technologies in the Republic of Belarus"]. Minsk, 2017, pp. 9–17.
10. Starzhinskiy V. E., Krauze V., Gavrilova O. V., Kudinov A. T., Simeonov S. *Plastmassovye zubchatye koleasa v peredachakh tochnogo priborostroeniya* [Plastic Gears in Instrument-Making Gear Drives]. Minsk: Navuka i tekhnika Publ., 1993. 307 p.
11. Starzhinskiy V. E., Timofeev B. P., Shalobaev E. V., Kudi-nov A. T. *Plastmassovye zubchatye koleasa v mehanizmah priborov. Raschet i konstruirovaniye* [Plastic Gears in Instrument Mechanisms. Calculation and Design]. Saint-Petersburg; Gomel: IMMS NANB Publ., 1998. 528 p.
12. Starzhinskiy V. E. *Zubchatye peredachi* [Gear Drives]. *Spravochnik po tekhnologii izdeliy iz plastmass* [Handbook on Plastic Item Technology]. Saint-Petersburg: Khimiya Publ., 2001, pp.124–156.
13. Starzhinskiy V. E., Shalobaev E. V., Shil'ko S. V., An-tonyuk V. E., Basinyuk V. L., Blagodarnyy V. M., Gol'd-farb V. I., Kapelevich A. L., Mardosevich E. I., Timofeev B. P., Tkachev A. A. *Elementy privoda priborov: raschet, konstruirovaniye, tekhnologii* [Elements of Instrument Drives. Com-putation, Designing, Technologies]. Minsk: Belaruskaya navuka Publ., 2012. 769 p.
14. Krasnorutskaya N. S., Flerov A. V., Shalobaev E. V. Proble-matika 3D-pechati [3D printing issues]. *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uche-nykh Universiteta ITMO* [Almanac of sci-entific works of young scientists of ITMO University]. Saint-Petersburg., 2016, vol. 3, pp. 9–11.
15. Shalobaev E. V., Perepelitsa F. A., Krasnorutskaya N. S. Ad-ditivnye tekhnologii v mashinostroenii [Additive technology in mechanical engineering]. *Sbornik materialov XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii: «Priborostroenie v XXI veke-2016. Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva»* [Collection of materials of the XII International scientific and technical confer-ence: “Instrument-making in the XXI century-2016. Integration of science, education and production”]. Izhevsk, 2017, pp. 319–323.

References

1. Koval'chuk M. V., Naraykin O. S. Prirodopodobnye tekhnologii — novye vozmozhnosti i novye ugrozy [Nature-Like Technologies - New Opportunities and New Threats]. *Indeks bezopasnosti* [Safety index], 2016, vol. 22, no. 3–4 (118–119), pp. 103–108.
2. Doroshenko V. S. O prirodopodobnykh tekhnologiyakh dlya tochnogo lit'ya [On nature-like technologies for precision casting]. *Liteyshchik Rossii* [Russian caster], 2018, no. 2, pp. 22–28.
3. Polatayko S. V., L'vov A. A. Filosofiya i "prirodopodobnyy pod-khod" v nauke [Philosophy and the “nature-like approach” in science]. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i sotsial'no-ekonomicheskikh nauk* [Actual problems of the humanities and socio-economic sciences], 2018, vol. 12, no. 4, pp. 86–89.
4. Shil'ko S. V., Ryabchenko T. V., Panin S. V., Shalobaev E. V. 3D-pechat' kak «prirodopodobnyy» sposob proizvodstva optimizirovannykh endoskopov [3D printing as a “nature like”

16. Perepelitsa F. A., Shalobaev E. V., Shil'ko S. V. Otechestvennoe programmnoe obespechenie dlya additivnykh tekhnologiy [Domestic software for additive technologies]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma «Perspektivy razvitiya additivnykh tekhnologiy v Respublike Belarus'»* [Collection of reports of the International scientific and practical symposium "Prospects for the development of additive technologies in the Republic of Belarus"]. Minsk, 2017, pp. 128–135.
17. Shil'ko S. V., Ryabchenko T. V., Gavrilenko S. L., Shalobaev E. V. Primenenie komp'yuternoy mekhaniki pri podgotovke CAD modeley dlya 3D-pechati gradientnykh materialov i izdeliy [The use of computer mechanics in the preparation of CAD models for 3D printing of gradient materials and products]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodno-nauchno-prakticheskogo simpoziuma «Perspektivy razvitiya additivnykh tekhnologiy v Respublike Belarus'»* [Collection of reports of the International scientific and practical symposium "Prospects for the development of additive technologies in the Republic of Belarus"]. Minsk, 2017, pp. 194–206.
18. Shalobaev E. V., Gavrilenko S. L., Perepelitsa F. A., Krasnorutskaya N. S., Demidov G. A. Issledovaniya svoystv plast-mass, ispol'zuemykh v additivnykh tekhnologiyakh, v zavisimosti ot programm-slayerov [Investigation of the properties of plastics used in additive technologies, depending on slicer programs]. *Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii «Polimernye kompozity i tribologiya (Polikomtrib-2017)»* [Abstracts of the International Conference "Polymer Composites and Tribology (Polycomtrib-2017)". Gomel', 2017, pp. 205–206.
19. Starzhinskiy V. E., Shil'ko S. V., Shalobaev E. V. Tekhnologiya proizvodstva zubchatykh koles iz termoplastichnykh polimernykh materialov (obzor) [Production technology of gears from thermoplastic polymer materials (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2018, vol. 4, no. 2, pp. 6–31.
20. Senchilo M. A., Perepelitsa F. A. Analiz programmnoy obespecheniya dlya obrabotki rezul'tatov lazernogo skanirvaniya i 3D-modelirovaniya [Analysis of software for processing the results of laser scanning and 3D modeling]. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i razrabotki* [Modern research and development], 2018, vol. 2, no. 12(29), pp. 838–841.
21. Zyablitseva E. V., Perepelitsa F. A. Tekhnologii 3D-modelirovaniya yuvelimnykh izdeliy [3D jewelry modeling technology]. *Sovremennoe obrazovanie: traditsii i innovatsii* [Modern Education: Traditions and Innovations], 2017, no. 1, pp. 196–198.
22. Polyakova D. A., Sokurenko Yu. A. Analiz zarubezhnykh i otechestvennykh issledovaniy problemy adaptatsii 3D-modeley dlya 3D-pechati [Analysis of foreign and domestic studies on the problem of adapting 3D models for 3D printing]. *Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO* [Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University]. Saint Petersburg, 2018, vol. 7, pp. 249–252.
23. Dovydenko E. M., Ivanova N. A., Chizhik S. A., Agabekov V. E. Opredelenie parametrov 3D-pechati otechestvennymi prutkami iz kompozitsionnykh polimernykh materialov na osnove ABS plastikov [Determination parameters of 3D printing with domestic composite polymer materials based on ABS plastics]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2018, no. 2, pp. 85–90.

Поступила в редакцию 16.04.2019

© Г. А. Демидов, А. Н. Карандашев, Е. В. Шалобаев, Ф. А. Перепелица, С. В. Шилько, В. Е. Старжинский, В. В. Дубровский, 2019