

УДК 004.925.84:678.073

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ 3D-ПЕЧАТИ ТЕРМОПЛАСТАМИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ

А. А. МИХАЛЬЧЕНКО

Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта», г. Гомель

А. Б. НЕВЗОРОВА, И. Б. ОДАРЧЕНКО

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Проведено комплексное исследование влияния параметров печати методом послойного нанесения расплавленной нити полимера (FDM) на механические свойства изделий из термопластика PLA. Установлены общие закономерности влияния температуры сопла, скорости и ориентации печати на изменение предела прочности при растяжении, предела текучести и модуля упругости образцов. Выявлены отличительные особенности FDM печати при различной ориентации слоев, позволяющие выяснить, что образцы, напечатанные в ориентации у, демонстрируют лучшие механические свойства, чем образцы, напечатанные в ориентации по осям x, z и 45 градусов. Это позволило определить оптимальные режимы для направленного регулирования физико-механических свойств, обеспечивающих получение изделий с повышенным эксплуатационным ресурсом.

Ключевые слова: аддитивные технологии, быстрое прототипирование, ориентация по осям, механические свойства.

INFLUENCE OF 3D PRINTING MODES WITH THERMOPLASTICS ON STRENGTH PROPERTIES OF PRODUCTS

A. A. MIKHALCHENKO

Educational Institution "Belarusian State University of Transport", the Republic of Belarus, Gomel

A. B. NEVZOROVA, I. B. ODARCHENKO

Educational Institution "Sukhoi State Technical University of Gomel", the Republic of Belarus

Authors present a comprehensive study of the effect of printing parameters by layer-by-layer application of molten polymer filament (FDM) on the mechanical properties of PLA thermoplastic products. General regularities of influence of nozzle temperature, printing speed and orientation on change of tensile strength, yield strength and modulus of elasticity of samples are established. The distinguishing features of FDM printing at different layer orientations have been identified to determine that samples printed in the Y orientation exhibit better mechanical properties than samples printed in the X, Z and 45 degree orientations. This made it possible to determine the optimal modes for directed control of physical and mechanical properties, which ensure the production of products with an increased operational life.

Keywords: additive technologies, rapid prototyping, orientation along axes, mechanical properties.

Введение

Технология FDM (Fused Deposition Modeling) – послойное наложение расплавленных нитевидных полимеров – позволяет изготавливать трехмерные детали слож-

ной формы непосредственно из неметаллического порошка (а также металлического порошка) без последующей обработки или с минимальной обработкой, а также интегрированные детали с высоким соотношением прочности к весу [1, 2]. Технология FDM также поддерживает разработку функционально классифицированных материалов (FGM). Это материалы с разработанным составом, структурой и (или) специфическими свойствами [3]. Однако эффективность процесса в значительной степени определяется оптимизацией времени печати детали, качества, точности размеров, стоимости производства и механических свойств.

Целостность процесса производства оказывает значительное влияние на качество конечного продукта [4]. Для того чтобы обеспечить технологический и экономический успех аддитивного производства (АП) на рынке, требуется подходящая система мониторинга процесса [5, 6]. Контроль позволяет проверять качество и своевременно вмешиваться в процесс печати и облегчает быстрые корректирующие действия [6]. Таким образом предотвращается дорогостоящая или невозможная корректировка конструкции детали во время автономного анализа [5].

В статье [7] представлены результаты экспериментального исследования на разрыв образцов, полученных методом 3D-печати из PLA при различных технологических режимах работы 3D-принтера. В качестве варьируемых параметров были выбраны: форма заполнения образцов (рис. 1), температура сопла (190–205 °С), коэффициент заполнения образца (от 10 до 40 %), наглядно представленный на рис. 2. Анализ экспериментальных данных показал существенное влияние изучаемых технологических параметров на условный предел текучести материала, который изменялся от 16,50 до 22,42 МПа. Однако, для более точной оценки качества изготовленных образцов необходимо учитывать и другие параметры: свойства материала, скорость печати, скорость охлаждения, диаметр сопла, траектория печати, ориентация печати и др.

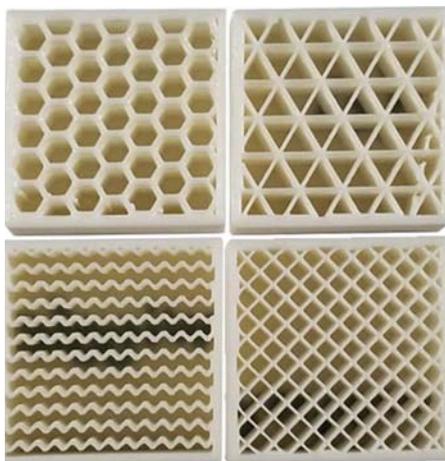


Рис. 1. Виды форм заполнения образцов



Рис. 2. Процентная степень заполнения при 3D-печати

Целью этого исследования является изучение влияния параметров печати на механические свойства деталей из FDM. Для целей данного исследования в качестве сырья используется термопластик PLA.

Материалы и методология

Подход, принятый в этом исследовании, следующий: сначала выбирается подходящая конструкция для испытуемого образца, затем следуют незначительные корректировки размеров образца в масштабе, чтобы учесть ограничения по объему сборки, связанные с имеющимся оборудованием.

За процессом проектирования последовал процесс изготовления. Был изготовлен комплект образцов. Набор **A** состоял из тридцати шести (36) отдельных печатных образцов (образцы от A1 до A36). Параметры процесса печати (температура сопла, скорость печати и ориентация печати) были скорректированы для каждой детали. Значения параметров печати, используемые в процессе изготовления, приведены в табл. 1.

Эти параметры были выбраны на основе рекомендаций для принтера с технологией печати FDM и технических характеристик материала. Для набора **A** использовался материал MakerBot PLA.

Таблица 1

Значения параметров, используемые при печати

Параметр печати	Значение		
Температура сопла, °C	220	215	200
Скорость печати, мм/с	60	40	20

Ориентация печати была скорректирована в направлениях x , y , z и 45 градусов, как показано на рис. 3. Список изготовленных образцов и параметры печати, скорректированные во время печати, приведены в табл. 2.

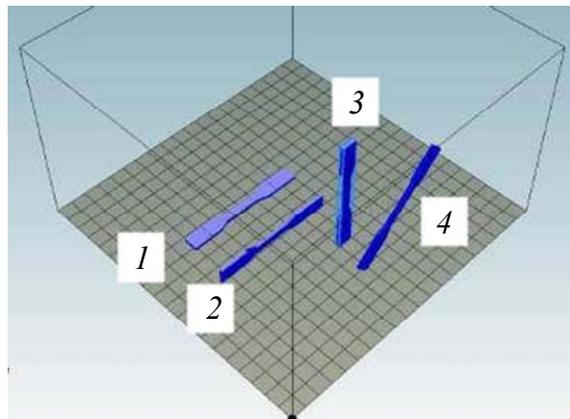


Рис. 3. Ориентация образцов, используемая при изготовлении набора образцов A:
1 – по оси x ; 2 – по оси y ; 3 – по оси z ; 4 – под углом 45 градусов

Целью экспериментального анализа выполненного комплекта было определение соотношения напряжение-деформация образцов, напечатанных FDM. Это было достигнуто путем проведения испытания на прочность при растяжении на образцах. Для проведения испытаний использовалась универсальная электромеханическая машина Instron-5969, предназначенная для испытаний материалов на сжатие, растяжение и изгиб в диапазоне нагрузок от 0 до 50 кН с целью определения физико-механических характеристик.

Испытание проводилось до тех пор, пока система не обнаружит установленный предел нагрузки, растяжение, деформацию или значительное уменьшение нагрузки, указывающее на разрушение образца. Наблюдалось влияние параметров печати, скорректированных во время изготовления (температура сопла, скорость печати и ориентация печати), на процесс печати детали. Было определено взаимодействие между параметрами печати и их влияние на механические свойства (предел прочности при растяжении, предел текучести, модуль Юнга и предел прочности при растяжении).

Таблица 2

Список образцов и параметров, используемых при печати на 3D-принтере

Номер образца	Температура сопла, °С	Скорость печати, мм/с	Ориентация
A1	220	60	<i>x</i>
A2			<i>y</i>
A3			<i>z</i>
A4		40	<i>x</i>
A5			<i>y</i>
A6			<i>z</i>
A7		20	<i>x</i>
A8			<i>y</i>
A9			<i>z</i>
A10	215	60	<i>x</i>
A11			<i>y</i>
A12			<i>z</i>
A13		40	<i>x</i>
A14			<i>y</i>
A15			<i>z</i>
A16		20	<i>x</i>
A17			<i>y</i>
A18			<i>z</i>
A19	200	60	<i>x</i>
A20			<i>y</i>
A21			<i>z</i>
A22		40	<i>x</i>
A23			<i>y</i>
A24			<i>z</i>
A25		20	<i>x</i>
A26			<i>y</i>
A27			<i>z</i>
A28	220	60	45°
A29		40	
A30		20	
A31	215	60	
A32		40	
A33		20	
A34	200	60	
A35		40	
A36		20	

Результаты и обсуждение

В процессе печати было установлено, что образцы, изготовленные в ориентации по оси x , печатались в кратчайшие сроки. Это было связано с меньшим количеством слоев, необходимых для завершения сборки детали в этой ориентации. Печать образцов, напечатанных в ориентации по оси 45 градусов, заняла значительно больше времени. Это было связано с требованием опорной конструкции. 3D-принтер не испытывал заметных трудностей при сборке образцов.

Влияние скорости печати на время печати было незначительным. Однако механический анализ показывает более заметное влияние параметра скорости печати на процесс печати и механические свойства конечного продукта.

Диаграммы для образцов A1, 4 и 7, представленные на рис. 4, показывают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 220 °C и снижение скорости печати с 60 до 40 и до 20 мм/с первоначально увеличило, а затем уменьшило модуль упругости образца.

Диаграммы для образцов A10, 13 и 16 показывают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 215 °C и снижение скорости печати с 60 до 40 и до 20 мм/с привело к снижению модуля упругости образца. Это также привело к снижению предела текучести образца. При этом предел прочности при растяжении сначала увеличился, а затем уменьшился.

Диаграммы для образцов A19, 22 и 25 показывают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 200 °C и снижение скорости печати с 60 до 40 и 20 мм/с привело к снижению модуля упругости образца, также это уменьшило предел текучести образца. При этом предел прочности при растяжении сначала увеличился, а после уменьшился.

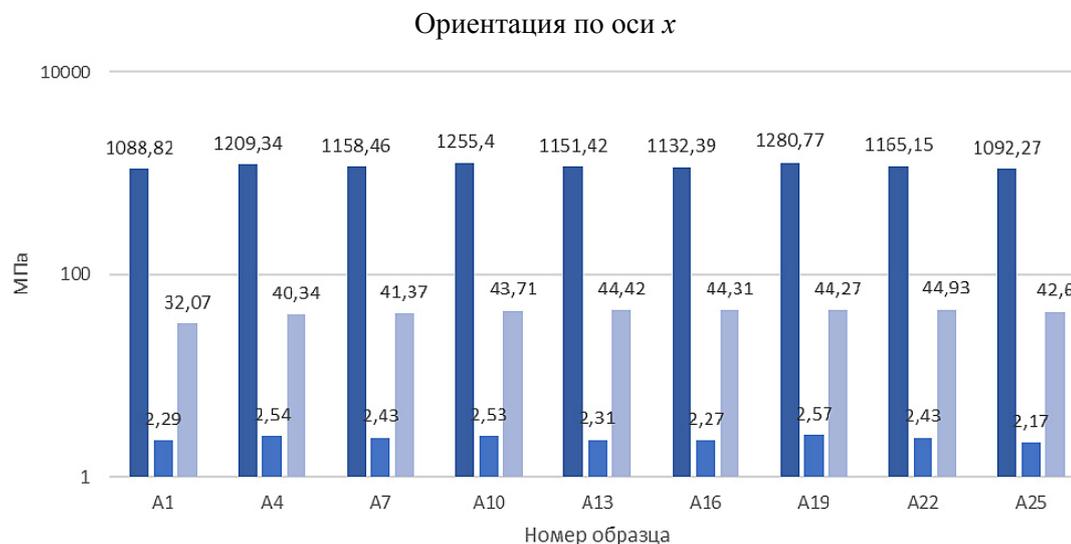


Рис. 4. Диаграмма изменения модуля упругости, предела текучести и предела прочности для образцов, изготовленных в ориентации x :

■ – модуль упругости, МПа; ■ – предел текучести, МПа;
 ■ – предел прочности, МПа

Диаграммы для образцов A2, 5 и 8, представленные на рис. 5, показывают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 220 °C и снижение скорости печати с 60 до 40 и 20 мм/с привело к снижению модуля упругости образца. Сначала это увеличило предел текучести образца, а после уменьшило его. В ответ на это предел прочности при растяжении уменьшился.

Диаграммы для образцов А11, 14 и 17 показывают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 215 °С и снижение скорости печати с 60 до 40 и до 20 мм/с первоначально уменьшило, а затем увеличило модуль упругости образца. Это также уменьшило, а затем увеличило предел текучести образца. Предел прочности при растяжении также изначально уменьшился, а затем увеличился.

Диаграммы для образцов А20, 23 и 26 показывают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 200 °С и снижение скорости печати с 60 до 40 и до 20 мм/с привело к снижению модуля упругости образца. Это привело сначала к снижению, а затем к увеличению предела текучести образца. При этом предел прочности при растяжении продолжил снижаться.

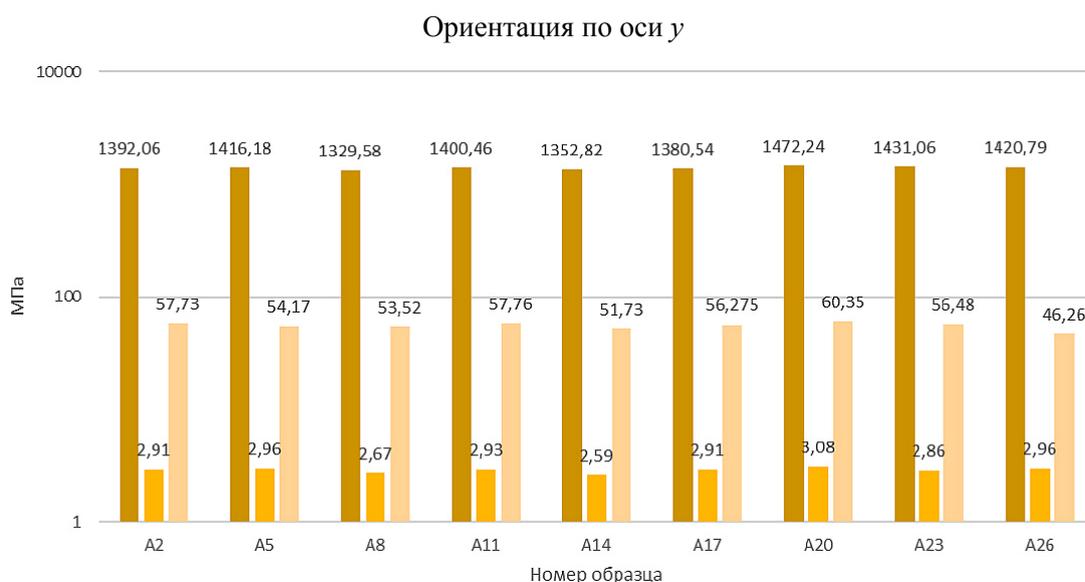


Рис. 5. Диаграмма изменения модуля упругости, предела текучести и предела прочности для образцов, изготовленных в ориентации у:

■ – модуль упругости, МПа; ■ – предел текучести, МПа;
 ■ – предел прочности при растяжении, МПа

Диаграммы для образцов А3, 6 и 9, представленные на рис. 6, показывают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 220 °С и снижение скорости печати с 60 до 40 и до 20 мм/с увеличило модуль упругости образца. Это также увеличило предел текучести образца, но при этом предел прочности при растяжении сначала уменьшился, а затем увеличился.

Диаграммы для образцов А12, 15 и 18 показывают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 215 °С и снижение скорости печати с 60 до 40 и до 20 мм/с первоначально уменьшило, а затем увеличило модуль упругости образца. Это привело к увеличению предела текучести образца, при этом предел прочности при растяжении сначала увеличился, а затем уменьшился.

Диаграммы для образцов А21, 24 и 27 предполагают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 200 °С и снижение скорости печати с 60 до 40 и до 20 мм/с привело к снижению модуля упругости образца. Это также привело к снижению предела текучести образца, но предел прочности при растяжении сначала увеличивался, а затем уменьшался.

Ориентация по оси z

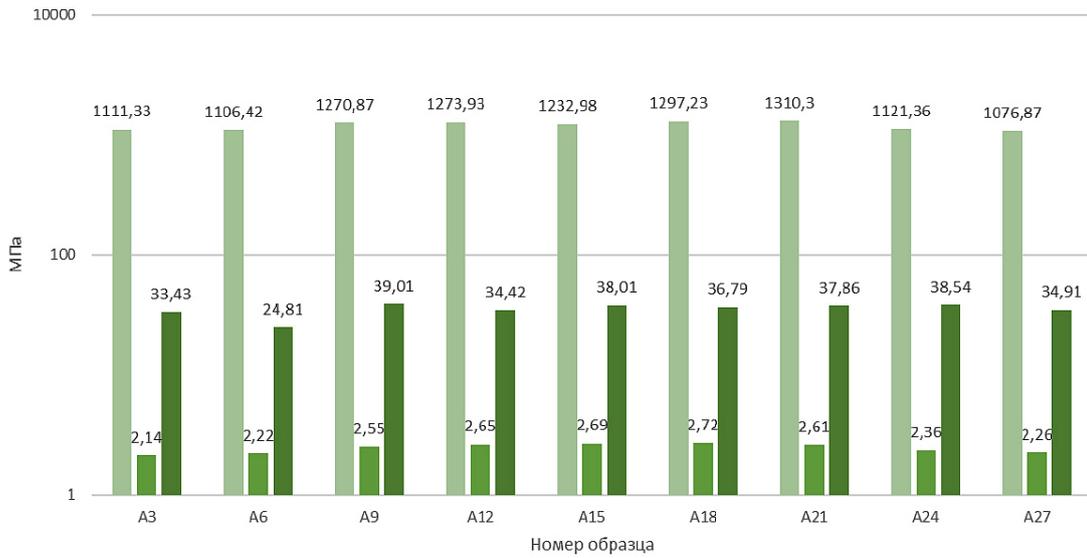


Рис. 6. Диаграмма изменения модуля упругости, предела текучести и предела прочности для образцов, изготовленных в ориентации z:
 ■ – модуль упругости, МПа; ■ – предел текучести, МПа;
 ■ – предел прочности при растяжении, МПа

Диаграммы для образцов А31, 32 и 33, представленные на рис. 7, показывают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 215 °С и снижение скорости печати с 60 до 40 и 20 мм/с привело к снижению модуля упругости образца. Это также привело к снижению предела текучести образца, при этом предел прочности при растяжении сначала уменьшался, а затем увеличивался.

Ориентация по оси 45 градусов

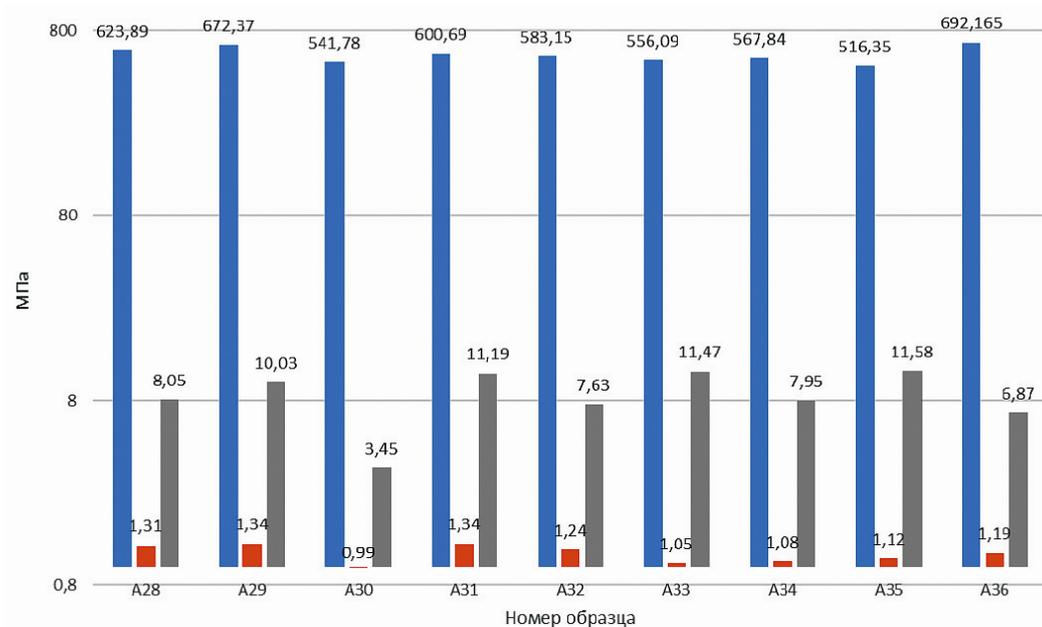


Рис. 7. Диаграмма изменения модуля упругости, предела текучести и предела прочности для образцов, изготовленных в ориентации 45 градусов:
 ■ – модуль упругости, МПа; ■ – предел текучести, МПа;
 ■ – предел прочности при растяжении, МПа

Диаграммы для образцов А34, 35 и 36 предполагают, что поддержание постоянной температуры сопла на уровне 200 °С и снижение скорости печати с 60 до 40 и до 20 мм/с первоначально уменьшило, а затем увеличило модуль упругости образца. Также это увеличило предел текучести образца. Предел прочности при растяжении первоначально увеличился, а затем уменьшился.

Заключение

Результаты первоначальной печати и оценки показывают, что образцы, напечатанные в ориентации *y*, демонстрируют лучшие механические свойства, чем образцы, напечатанные в ориентации по осям *x*, *z* и 45 градусов.

Для образцов, напечатанных в ориентации по оси *x*, образец А19, напечатанный при температуре сопла 200 °С и скорости печати 60 мм/с, обладает самым высоким пределом текучести и модулем упругости, однако образец А22 (напечатанный при температуре сопла 200 °С и скорости печати 40 мм/с) обладает самой высокой предельной прочностью на растяжение. Образец А1 (напечатанный при температуре сопла 220 °С и скорости печати 60 мм/с) обладает наименьшим модулем упругости, в то время как образец А25 (напечатанный при температуре сопла 200 °С и скорости печати 20 мм/с) обладает наименьшим пределом текучести.

Для образцов, напечатанных в ориентации по оси *y*, образец А20, напечатанный при температуре сопла 200 °С и скорости печати 60 мм/с, обладает самым высоким пределом текучести, модулем упругости и пределом прочности при растяжении. Образец А14 (напечатанный при температуре сопла 215 °С и скорости печати 40 мм/с) обладает самым низким модулем упругости и пределом текучести.

Для образцов, напечатанных в *z*-ориентации, образец А21, напечатанный при температуре сопла 200 °С и скорости печати 60 мм/с, обладает самым высоким модулем упругости. Образец А18 (напечатанный при температуре сопла 215 °С и скорости печати 20 мм/с) обладает самым высоким пределом текучести. Образец А9 (напечатанный при температуре сопла 220 °С и скорости печати 40 мм/с) обладает самой высокой предельной прочностью на растяжение. Образец А27 (напечатанный при температуре сопла 200 °С и скорости печати 20 мм/с) обладает самым низким модулем упругости и пределом текучести.

Для образцов, напечатанных с ориентацией по оси 45 градусов, образец А36, напечатанный при температуре сопла 200 °С и скорости печати 20 мм/с, обладает самым высоким модулем упругости. Образец А29 (напечатанный при температуре сопла 220 °С и скорости печати 40 мм/с) обладает самым высоким пределом текучести. Образец А35 (напечатанный при температуре сопла 200 °С и скорости печати 40 мм/с) обладает самой высокой предельной прочностью на растяжение. Образец А35 (напечатанный при температуре сопла 200 °С и скорости печати 40 мм/с) также обладает самым низким модулем упругости. Образец А30 (напечатанный при температуре сопла 220 °С и скорости печати 20 мм/с) обладает самым низким пределом текучести.

Литература

1. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении : пособие для инженеров / М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М. : ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.
2. Design and management of manufacturing systems for production quality / M. Colledani [et al.] // CIRP Annals-Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63. – N 2. – P. 773–796.

3. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing / S. K. Everton [et al.] // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 95. – P. 431–445.
4. Михальченко, А. А. Исследование качества деталей из различных видов пластика, изготовленных методом FDM-печати / А. А. Михальченко // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г. В 2 ч. Ч. 1 / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2022. – С. 99–101.
5. Михальченко, А. А. Перероблені полімери для 3d-друку / А. А. Михальченко // Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих вчених за тематикою «Сучасні комп'ютерні системи та мережі в управлінні»: збірка наукових праць / під редакцією А. А. Григорової. – Херсон : Видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2022. – С. 64–66.
6. Михальченко, А. А. Исследование на разрыв пластика ПЭТ-бутылок и его переработка для производства филаментов для 3d-печати / А. А. Михальченко // Проблемы безопасности на транспорте : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 160-летию Белорус. ж. д., Гомель, 24–25 нояб. 2022 г. : в 2 ч. Ч. 2 / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. ж. д., Белорус. гос. ун-т трансп. ; под общ. ред. Ю. И. Кулаженко. – Гомель : БелГУТ, 2022. – С. 222–223.
7. Исследование прочностных характеристик изделий, полученных методом 3D-печати из PLA / В. А. Ермакова [и др.] // *Наука и техника*. 2022. – Т. 21, № 2. – С. 107–113.

References

1. Zlenko M. A., Nagajtsev M. V., Dovbysh V. M. *Additive technologies in mechanical engineering*. Moscow, GNTs RF FGUP «NAMI» Publ., 2015. 220 p. (in Russian).
2. Colledani M., Tolio T., Fischer A., Iung B., Lanza G., Schmitt R., V'ancza J. Design and management of manufacturing systems for production quality. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, no. 2, pp. 773–796.
3. Everton S. K., Hirsch M., Stravroulakis P., Leach R. K., Clare A. T. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials & Design*, 2016, vol. 95, pp. 431–445.
4. Mikhal'chenko A. A. Investigation of the quality of parts made of various types of plastic made by FDM printing. *Issledovaniya i razrabotki v oblasti mashinostroeniya, energetiki i upravleniya: materially XXII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchennykh, Gomel'*, 28–29 apr. 2022 g. Ch. 1 [Research and development in the field of mechanical engineering, energy and management: materials of the XXII International Scientific and Technical conf. of students, postgraduates and young scientists, Gomel, April 28–29, 2022. Part 1]. Gomel', 2022, pp. 99–101 (in Russian).
5. Mikhal'chenko A. A. Recycled polymers for 3d printing. *Materiali V Vseukrains'koi naukovo-praktichnoi internet-konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodih vchenih za tematikozu «Suchasni komp'juterni sistemi ta merezhi v upravlinni»: zbirka naukovih prats'* [Materials of the V All-Ukrainian scientific and practical Internet Conference of students, postgraduates and young scientists on the topic “modern computer systems and technologies in management”: a collection of scientific papers]. Herson: FOP Vishemir'skij V. S. Publ., 2022, pp. 64–66 (in Ukraine).

6. Mikhal'chenko A. A. Research on the rupture of plastic PET bottles and its processing for the production of filaments for 3D printing. *Problemy bezopasnosti na transporte: XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyasch. 160-letiju Bel. zh. d., Gomel', 24–25 nojabrja 2022 g. Ch. 2* [Problems of transport safety : materials of the XII International Scientific and Practical Conference, dedicated to 160th anniversary of Bel. zh. d., Gomel, November 24–25, 2022. Part 2]. Gomel', 2022, pp. 222–223.
7. Ermakova V. A., Gasperovich E. V., Ermakov A. I., Litvjak V. V. Study of the strength characteristics of products obtained by 3D printing from PLA. *Nauka i tehnika = Science & Technique*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 107–113 (in Russian).

Поступила 02.02.2023 г.