

Влияние параметров 3D-печати на механические свойства изделий из полиэтилентерефталатгликоля (PET-G)

О. Ю. Елагина, А. А. Ушкарев, Л. А. Савенков

Рассмотрено влияние параметров 3D-печати, таких как процент и угол заполнения, а также ширина раstra, на механические свойства образцов, изготовленных из полиэтилентерефталатгликоля методом FDM-печати (Fused Deposition Modeling). На основе выполненных исследований получены выражения, позволяющие проводить расчет ожидаемых механических свойств изделий, изготовленных из исследованной марки PET-G и работающих в условиях одноосного растяжения, статического и ударного изгиба. Показано влияние переменных параметров печати на формируемый уровень свойств изделий, что позволит проводить подбор их значений в зависимости от поставленных задач.

Ключевые слова: механические свойства, FDM-печать, полиэтилентерефталатгликоль, процент заполнения, угол заполнения, ширина раstra.

DOI: 10.30791/1028-978X-2023-5-82-88

Введение

Внедрение аддитивных технологий в нефтегазовую отрасль в последние годы наиболее активно по данным [1] развивается в трех направлениях: прототипирование, производство функциональных компонентов и производство инструмента. Наибольший интерес среди перечисленных направлений представляет изготовление функциональных элементов, таких как уплотнения, прокладки, оснастка, запчасти, корпуса, крышки, шестерни, шарниры и другие детали машин и механизмов [2]. Возможность их изготовления непосредственно на месте производства работ позволяет существенно снизить затраты времени на проведение закупочных процедур и логистику, что имеет особую актуальность для нефтегазовой отрасли в связи со значительной удаленностью месторождений.

Одним из наиболее распространенных материалов, применяемых при аддитивной печати, является полиэтилентерефталатгликоль. PET-G имеет существенные преимущества перед другими распространенными материалами по своим физико-механическим свойствам и повышенной химической стойкости. Однако, параметры FDM-печати оказывают значительное влияние на свойства по-

лучаемых изделий. Среди наиболее важных можно выделить высоту и толщину слоя, ширину экструзии, угол заполнения, величину плотности заполнения и др. Отсутствие в литературе комплексных обобщенных исследований о влиянии параметров печати на физико-механические свойства изделий из PET-G существенно ограничивает применение данного пластика в промышленности, в том числе в нефтегазовой сфере.

Цель настоящей работы — исследование влияния пространственно-ориентационных факторов FDM-печати на механические свойства образцов из PET-G.

Материал, оборудование и методики испытаний

В качестве материала для исследования был выбран полиэтилентерефталатгликоль (ПЭТГ) марки PET-G компании Geek Fil/lament. Основные физико-механические свойства которого представлены табл. 1.

Экспериментальные образцы из PET-G для испытаний изготавливались на модернизированном кафедрой трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования промышленном

Таблица 1

Физико-механические свойства PET-G производителя филамента Geek Fil/lament [3]

Table 1

Physical and mechanical properties of PETG of Geek Fil/lament manufacturer [3]

Характеристики	Значение
Температура плавления, °C	225 – 235
Температура стеклования, °C	60 – 70
Плотность, г/см ³	1,27
Температура эксплуатации, °C	-40 ÷ +70
Температура деформации, °C	90
Модуль упругости при растяжении, МПа	1422,5
Предел прочности при растяжении, МПа	31
Модуль упругости при изгибе, МПа	76
Предел прочности при изгибе, МПа	2060
Ударная вязкость, кДж/м ²	19,85
Твердость по Шору, <i>D</i>	72
Относительное удлинение при растяжении, %	2,9
Усадка	Низкая

3D-принтере SolidCad S650. В табл. 2 представлены технологические параметры печати, которые не изменялись и были постоянными при изготовлении всех образцов.

В качестве регулируемых параметров FDM-печати были выбраны ширина линий экструзии, угол и плотность заполнения образцов. Указанные параметры вносят наибольший вклад в величину механических свойств получаемых изделий и в обязательном порядке регулируются при FDM-печати на большинстве 3D-принтеров.

При FDM-печати ширина растра (ширина линий экструзии) обычно задается равной диаметру сопла ($d_{\text{сопла}}$), однако, с целью увеличения/уменьшения времени печати и качественных характеристик получаемой детали ширина линий экструзии может варьироваться от $0,5d_{\text{сопла}}$ до $2d_{\text{сопла}}$. Чем больше показатель ширины линий, тем меньшее их количество будет содержаться в одном слое модели, что, в свою очередь, влечет за собой уменьшение как времени печати, так и разрешения.

Плотность заполнения — это сплошность внутренней части модели, равная отношению заполненного филаментом пространства ко всему внутреннему объему изготавливаемого на 3D-принтере изделия. Данный показатель будет определять наличие пустот внутри получаемого объекта.

Направление или угол укладки нити — это угол между линией экструдированной нити и го-

Таблица 2

Технологические параметры FDM-печати, применяемые для изготовления образцов

Table 2

Technological parameters of FDM-printing used for the production of samples

Параметр	Значение
Тип слайсера	Ultimaker Cura 4.11
Тип сопла	Volcano
Диаметр сопла, мм	0,4
Расстояние от сопла до стола, мм	0,15
Температура печати первого слоя, °C	240
Температура печати последующих слоев, °C	230
Температура стола, °C	65
Скорость подачи филамента, мм/мин	180
Высота слоя, мм	0,15
Ширина линии стенки, мм	0,4
Количество стенок	3
Количество слоев дна	3
Количество слоев крышки	3
Скорость печати, мм/с	
а) Первый слой	30
б) Последующие слои	60
Величина ретракта, мм	7
Скорость ретракта, мм/с	35

ризонтально. Направление заполнения оказывает существенное влияние на физико-механические характеристики изготавливаемых изделий — предел прочности и модуль при растяжении и изгибе и относительное удлинение [4, 5].

Образцы для испытаний печатали с плотностью заполнения 100, 75, 50 и 25 %. Внутреннее заполнение образцов проводили продольно с углом заполнения 0°, поперечно с углом заполнения 90°, а также под углом 45°. Ширину линий заполнения принимали равной 0,4 и 0,8 мм.

Полученные образцы испытывали на одноосное растяжение, статический изгиб и ударную вязкость. Одноосное статическое растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) [6] на образцах тип 1B с шириной узкой (рабочей) части — $10,0 \pm 0,2$ мм, толщиной — $4,0 \pm 0,2$ мм. Испытания на растяжение осуществляли на универсальной разрывной машине Shimadzu AGS-X при скорости испытаний 5 мм/мин. Для определения модуля упругости при растяжении на образец устанавливали экстензометр MFA25, скорость испытаний составляла 1 мм/мин.

Испытания на статический изгиб проводили в соответствии с ГОСТ 4648-2014 (ISO 178:2010) [7] на прямоугольных образцах длиной 80 ± 2 мм с размерами в поперечном сечении аналогичными рабочей части образцов на растяжение. Радиус опор составлял 5 мм, расстояние между опорами — 64 мм. При определении предела прочности на изгиб скорость испытаний была равна 10 мм/мин в соответствии с требованиями нормативно-технической документации [7]. Для определения модуля упругости при изгибе для измерения прогиба образца использовали экстензометр Mitutoyo LGF-OSSOL при этом скорость испытаний составляла 2 мм/мин.

Испытания на ударную вязкость по Изоду проводили на установке МТ 203 в соответствии с ГОСТ 19109-2017 (ISO 180:2000) [8] на образцах длиной 80 ± 2 мм с шириной $10 \pm 0,2$ мм и толщиной $4 \pm 0,2$ мм.

Определение каждого из перечисленных параметров проводили на 5 однотипных образцах. С использованием полученных результатов определяли среднеарифметические значения показателей механических свойств и стандартные отклонения.

Обсуждение результатов

Средние значения предела прочности в зависимости от различных параметров FDM-печати представлены в табл. 3. Из анализ полученных данных следует, что более высокий уровень прочностных свойств фиксируется при ширине раstra

0,4 мм при всех вариантах исполнения образцов. Превышение уровня прочности при ширине раstra 0,4 мм в отличие от 0,8 мм между аналогичными образцами по углу и проценту заполнения составляет от 4 – 7 % для 100 % заполнения и доходит до 19 – 26 % при 25 % заполнении для одноосного растяжения и до 13 – 18 % для статического изгиба.

Увеличение угла заполнения от 0° до 90° приводит к снижению предела прочности, как при растяжении, так и при изгибе. Минимальное снижение на 15 – 16 % достигается при 100 % заполнении. По мере снижения процента заполнения до 25 % изменение угла заполнения приводит к уменьшению величины предела прочности на 41 – 47 % при растяжении и до 36 – 37 % при изгибе. При этом следует отметить, что разница в прочностных свойствах образцов, выполненных под углом 45° и 90° при испытаниях на растяжение наиболее значительна при заполнении 75 % и составляет 14 – 17 %. При дальнейшем снижении заполненности образцов до 50 % и 25 % эта разница постепенно сокращается до 8 % и 3 %, соответственно. При испытаниях на изгиб снижение процента заполнения образцов достигает 27 – 30 % при 50 % заполнении и далее уже не меняется.

Функционально влияние процента заполнения на предел прочности образцов, выполненных из PET-G, на всех исследованных углах заполнения описывается экспоненциальной зависимостью (рис. 1).

Обработка результатов экспериментальных исследований позволила получить следующие зави-

Таблица 3

Влияние параметров FDM-печати на значения предела прочности при растяжении (ширина раstra 0,4 мм/0,8 мм)

Table 3

Influence of FDM-printing parameters on the values of tensile strength (grid width 0.4 mm/0.8 mm)

Процент заполнения, %	Угол заполнения, град.	Предел прочности при растяжении, МПа		Предел прочности при изгибе, МПа	
		среднее	стандартное отклонение	среднее	стандартное отклонение
100	0	57/54	2,7/2,1	69/64	2,3/1,6
	45	49/46	4,1/2,8	61/55	1,3/1,9
	90	48/46	2,6/2,4	57/53	3,6/1,7
75	0	45/41	0,4/0,9	61/53	0,8/2,4
	45	33/26	1,0/1,8	53/46	4,7/0,9
	90	25/20	1,5/1,3	50/44	2,4/1,9
50	0	38/34	2,9/1,4	57/49	1,9/3,1
	45	23/21	1,0/2,1	44/34	1,9/1,2
	90	20/18	1,6/2,6	40/36	2,3/1,3
25	0	34/27	0,9/2,6	45/38	1,7/2,3
	45	19/16	6,2/1,3	35/31	1,6/2,6
	90	18/15	3,1/0,5	29/25	1,9/2,2

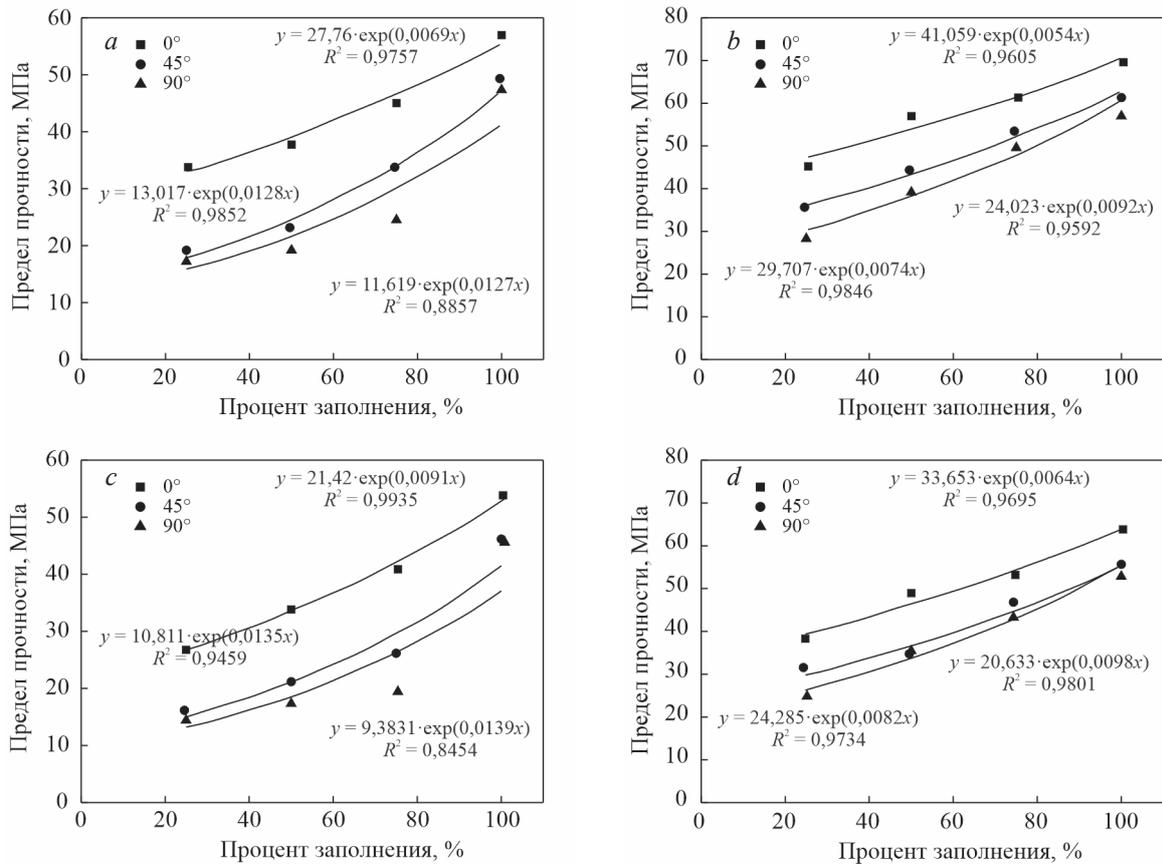


Рис. 1. Зависимости предела прочности при одноосном растяжении (a, c) и статическом изгибе (b, d) образцов из PET-G от угла и плотности заполнения при ширине раstra: a, b — 0,4 мм, c, d — 0,8 мм.

Fig. 1. Dependences of the tensile strength in uniaxial tension (a, c) and static bending (b, d) of PET-G specimens on the angle and filling density at the raster width: a, b — 0.4 mm, c, d — 0, 8 mm.

симости для расчета предела прочности изделий, выполненных из PET-G:

для ширины раstra 0,4 мм

растяжение —

$$\sigma_B = (0,0033x^2 - 0,4759x + 27,761) \times \exp\left[(-10^6 x^2 + 0,0002x + 0,0069) y\right],$$

статический изгиб —

$$\sigma_B = (0,0014x^2 - 0,3152x + 41,059) \times \left[(2 \cdot 10^{-7} x^2 + 0,00001x + 0,0064) y \right],$$

для ширины раstra 0,8 мм

растяжение —

$$\sigma_B = (0,0023x^2 - 0,3379x + 21,424) \times \left[(-10^6 x^2 + 0,0001x + 0,0091) y \right],$$

статический изгиб —

$$\sigma_B = (0,0014x^2 - 0,2717x + 33,653) \times \exp\left[(-5 \cdot 10^{-8} x^2 + 0,00004x + 0,0064) y\right],$$

где x — угол заполнения, град.; y — плотности заполнения, %.

Аналогичным образом была выполнена обработка значений модуля упругости образцов, выполненных из PET-G, полученных при статическом растяжении и изгибе (рис. 2).

Из зависимостей модуля упругости при растяжении от угла заполнения видно отсутствие разницы в полученных значениях при 100 % плотности образцов. При изгибе модуль упругости больше зависит от угла заполнения и переход от 0° к 90° снижает этот показатель на 18–20 %. По мере снижения процента заполнения разница в значениях модуля упругости как при растяжении, так и при изгибе, полученных при угле 0° по сравнению с 45° и 90° нарастает и составляет от 19 до 35 %. При этом между углами 45° и 90° разница в значениях модуля упругости — 12–18 %.

Обработка результатов экспериментальных исследований позволила получить следующие за-

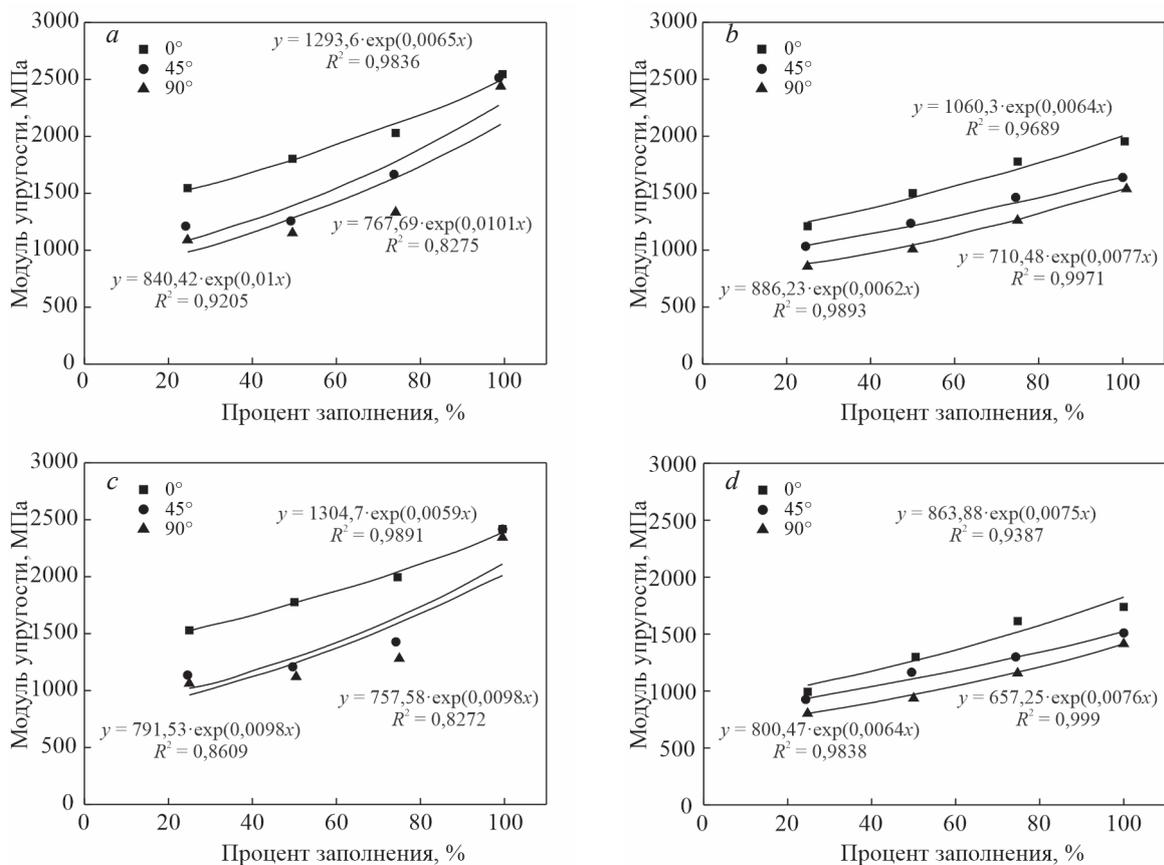


Рис. 2. Зависимости модуля упругости при одноосном растяжении (а, с) и статическом изгибе (b, d) образцов из PET-G от угла и плотности заполнения при ширине раstra: а, b — 0,4 мм, с, d — 0,8 мм.

Fig. 2. Dependences of the modulus of elasticity in uniaxial tension (a, c) and static bending (b, d) of PET-G specimens on the angle and filling density at a raster width: a, b — 0.4 mm, c, d — 0.8 mm.

висимости для расчета модуля упругости изделий, выполненных из PET-G:

для ширины раstra 0,4 мм
растяжение —

$$E_{st} = (0,0939x^2 - 14,298x + 1293,6) \times \exp\left[(-8 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0001x + 0,0065)y\right],$$

статический изгиб —

$$E_b = (-0,0004x^2 - 3,8496x + 1060,3) \times \exp\left[(4 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,00002x + 0,0064)y\right],$$

для ширины раstra 0,8 мм
растяжение —

$$E_{st} = (0,1183x^2 - 16,728x + 1304,7) \times \exp\left[(-7 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,0001x + 0,0069)y\right],$$

статический изгиб —

$$E_b = (-0,0197x^2 - 0,5223x + 863,88) \times \exp\left[(6 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,00005x + 0,0075)y\right],$$

где x — угол заполнения, град.; y — плотности заполнения, %.

Наиболее высокий уровень свойств в испытаниях на ударный изгиб демонстрируют образцы с углом заполнения 45°. Ударная вязкость образцов со 100 % заполнением превышает на 10 % результаты, полученные при других углах заполнения. По мере снижения процента заполнения образцов разница между значениями снижается (рис. 3).

Обработка результатов экспериментальных исследований позволила получить следующие зависимости для расчета ударной вязкости изделий, выполненных из PET-G:

для ширины раstra 0,4 мм

$$a_k = (-0,00002x^2 + 0,0013x + 0,8904) \times \exp\left[(-2 \cdot 10^{-7}x^2 + 0,00002x + 0,0088)y\right],$$

для ширины раstra 0,8 мм

$$a_k = (-0,00006x^2 + 0,0045x + 0,8954) \times$$

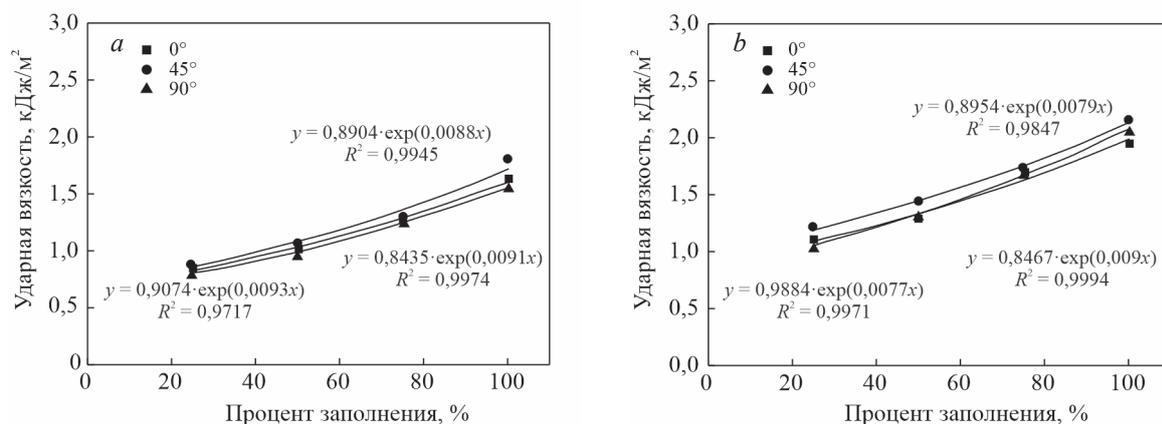


Рис. 3. Зависимости ударной вязкости образцов из PET-G от угла и плотности заполнения при ширине раstra: *a* — 0,4 мм, *b* — 0,8 мм.

Fig. 3. Dependences of the impact strength of PET-G specimens on the angle and filling density at a raster width: *a* — 0.4 mm, *b* — 0.8 mm.

$$\times \exp\left[\left(4 \cdot 10^{-7} x^2 - 0,00002x + 0,0079\right)y\right],$$

где x — угол заполнения, град.; y — плотности заполнения, %.

Выводы

Изменение механических свойств образцов исследованной марки PET-G от процента заполнения носит экспоненциальный характер, а влияние угла заполнения описывается степенной зависимостью.

Наибольшее влияние на уровень прочностных свойств образцов при растяжении и изгибе оказывает процент и угол заполнения, вклад ширины раstra значительно ниже.

Наиболее высокие значения предела прочности при растяжении и изгибе получены при ориентации печати под углом заполнения 0° .

Показатели ударной вязкости существенно зависят от процента заполнения и ширины раstra, влияние угла заполнения на данный показатель существенно ниже.

Литература/References

1. Попадюк С.С. Опыт СИБУР по внедрению на производстве аддитивных технологий. Автоматизация в промышленности, 2019, № 7, с. 40 – 41.
- Popadyuk S.S. Опыт SIBUR по vnedreniyu na proizvodstve additivnyh tekhnologij [Sibur's experience in additive technologies application]. Avtomatizaciya v promyshlennosti [Automation in Industry], 2019, no. 7, pp. 40 – 41, (in Russ.).
2. Ksawery Szykiedans, Wojciech Credo, Dymitr Osinski. Selected mechanical properties of PETG 3-D prints. Procedia Engineering, 2017, v. 177, pp. 455 – 461.
3. Побелянский А.В., Мустейкис А.И., Галаджун А.А., Круглов Д.С. Исследование возможности применения деталей из термостойких пластиков и их испытание в составе малоразмерного газотурбинного двигателя Исследования наукограда, 2017, т. 1, № 2 (20), с. 76 – 81.
- Pobelyanskij A.V., Mustejkis A.I., Galadzhun A.A., Kruglov D.S. Issledovanie vozmozhnosti primeneniya detalej iz termostojkih plastikov i ih ispytanie v sostave malorazmernogo gazoturbinnogo dvigatelya [Research of the possibility of using parts from heat-resistant plastics and their testing as part of a small-sized gas turbine engine], 2017, v. 1, no. 2 (20), pp. 76 – 81, (in Russ.).
4. Riddick J.C., Haile M.A., Von Wahlde R, Cole D.P., Bamiduro O., Johnson T.E., Fractographic analysis of tensile failure of acrylonitrile-butadiene-styrene fabricated by fused deposition modeling. Additive Manufac., 2016, v. 11, pp. 49 – 59.
5. Shanmugam V., Johnson D.J., Babu K., Rajendran S., Veerasimman A., Marimuthu U., Singh S., Das O., Neisiany R.E., Hedenqvist M.S., Berto F., Ramakrishna S., The mechanical testing and performance analysis of polymer-fibre composites prepared through the additive manufacturing, Polym. Test., Jan. 2021, v. 93, art. 106925.
6. ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012). Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартиформ, 2018, 24 с.
- GOST 11262-2017 (ISO 527-2:2012). Plastics. Determination of tensile properties, Moscow, Standartinform, 2018, 24 p.

7. ГОСТ 4648-2014 (ISO 178, 2010). Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. М.: Стандартиформ, 2018, 25 с.
8. ГОСТ 19109-2017 (ISO 180:2000). Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду. М.: Стандартиформ, 2018, 19 с.
- GOST 4648-2014 (ISO 178, 2010). Plastics. Determination of flexural properties. Moscow, Standartinform, 2018, 25 p.
- GOST 19109-2017 (ISO 180:2000), Plastics. Izod impact strength method. Moscow, Standartinform, 2018, 19 p.

*Статья поступила в редакцию — 01.08.2022 г.
после доработки — 25.08.2022 г.
принята к публикации — 26.08.2022 г.*

Елагина Оксана Юрьевна — Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (Москва, 119991, Ленинский проспект, 65), доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, специалист в области материаловедения (машиностроения), процессов и оборудования создания защитных покрытий, сварочных технологий, материаловедения. E-mail: elaguina.o@gubkin.ru.

Ушкареев Андрей Александрович — Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (Москва, 119991, Ленинский проспект, 65), заведующий лабораторией 3D печати. Специалист в области FDM и VPP печати, твердомерии, аналитической химии и радиохимии. E-mail: ushkarev.a@gubkin.ru.

Савенков Леонид Александрович — Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина (Москва, 119991, Ленинский проспект, 65), аспирант. E-mail: leonidsavenkov5@gmail.com.

Influence of 3D-printing parameters on mechanical properties of polyethylene terephthalate glycol (PET-G) products

O. Yu. Elagina, A. A. Ushkarev, L. A. Savenkov

The article considers the influence of such parameters as infill density, infill line directions and line width on the mechanical properties of samples made of polyethylene terephthalate glycol by FDM-printing. Mathematical expressions were obtained on the basis of the conducted research. These mathematical expressions allow to calculate the expected mechanical properties of the studied PET-G brand under uniaxial tensile, static and impact bending. The influence of variable FDM-printing parameters on the formed level of product properties is investigated, which will allow the selection of their values depending on the required tasks.

Key words: mechanical properties, FDM-printing, polyethylene terephthalate glycol, infill density, infill line directions, line width.

Elagina Oksana — National University of Oil and Gas “Gubkin University” (Moscow 119991, Leninskiy pr., 65), Dr Sci (Eng), professor; head of chair, specialist in the field of processes and equipment for the production of protective coatings, welding technologies, materials science (mechanical engineering). E-mail: elaguina@mail.ru.

Ushkarev Andrey — National University of Oil and Gas “Gubkin University” (Moscow 119991, Leninskiy pr., 65), head of 3D printing laboratories, specialist in FDM and VPP printing, hardness testing, analytical chemistry and radiochemistry. E-mail: ushkarev.a@gubkin.ru.

Savenkov Leonid — National University of Oil and Gas “Gubkin University” (Moscow 119991, Leninskiy pr., 65), postgraduate student. E-mail: leonidsavenkov5@gmail.com.