

Научная статья
УДК 678.01:53:004.925.84
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.015

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ И ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧАЕМЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ

Валентина Геннадьевна Василевич¹, Олег Иосифович Карпович², Григорий Андреевич Величко³

^{1–3}Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

¹va.valentina@bk.ru

²oll-123@rambler.ru

³grigorijv05@gmail.com

Аннотация

Приведены значения пределов прочности и модулей упругости при растяжении и изгибе в зависимости от температуры для изделий из термопластичных полимеров, получаемых методом FDM-печати. Определены зависимости вязкоупругих характеристик таких изделий от температуры. Построены зависимости прочностных, упругих и вязкоупругих характеристик от температуры.

Ключевые слова:

аддитивные технологии, термопластичные полимеры, механические и вязкоупругие характеристики, температурные зависимости

Для цитирования:

Василевич В. Г., Карпович О. И., Величко Г. А. Температурные зависимости прочностных и вязкоупругих характеристик изделий, получаемых методом FDM-печати // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2024. Т. 15, № 1. С. 98–104. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.015.

Original article

TEMPERATURE DEPENDENCES OF STRENGTH AND VISCOELASTIC CHARACTERISTICS OF FDM-PRINTED PRODUCTS

Valiantsina H. Vasilevich¹, Aleh I. Karpovich², Ryhor A. Vialichka³

^{1–3}Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

¹va.valentina@bk.ru

²oll-123@rambler.ru

³grigorijv05@gmail.com

Abstract

The paper presents results of tensile strength and elastic modulus in tension and bending depending on temperature for products made of thermoplastic polymers produced by FDM-printing. The dependences of the viscoelastic characteristics of such products on temperature are obtained. The dependences of strength, elastic and viscoelastic characteristics on temperature were constructed.

Keywords:

additive technologies, thermoplastic polymers, mechanical characteristics, viscoelastic characteristics, temperature dependences

For citation:

Vasilevich V. H., Karpovich A. I., Vialichka R. A. Temperature dependences of strength and viscoelastic characteristics of FDM-printed products // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2024. Vol. 15, No. 1. P. 98–104. doi:10.37614/2949-1215.2024.15.1.015.

Введение

В связи с большой ролью, которую в настоящее время играют полимеры как конструкционные материалы, а также в связи с проблемой переработки их в изделия изучение механических свойств полимеров в условиях, приближённых к эксплуатационным, приобретает исключительно важное значение. С учётом того, что характеристики полимеров и композиций на их основе существенно зависят от условий внешней среды, а особенно температуры, сведения о таких зависимостях необходимы. Также надо учитывать факт, что свойства материалов в изделиях, получаемых с использованием аддитивного синтеза, как правило, ниже, чем у изделий, получаемых с использованием традиционных технологий.

Вязкоупругое поведение следует принимать в расчёт на стадии разработки и моделирования изделий, это позволяет предсказать реакцию полимера на различные виды нагрузок и деформаций. Производители материалов для аддитивного синтеза не приводят данных о вязкоупругих характеристиках при температурах, превышающих комнатную, а исследования в литературе отсутствуют [1–6].

Целью данной работы являлось получение данных, необходимых для расчётов на прочность и жёсткость изделий, полученных методом FDM-печати и работающих в условиях повышенных температур и длительного воздействия нагрузок.

Результаты исследований

Для исследований использовали распространённые для 3D-печати термопластичные полимеры: акрилонитрилбутадиенстирол (ABS), полиэтилентерефталат гликоль (PETG), полилактид (PLA), полипропилен (PP). Изготовление образцов с помощью аддитивных технологий проводили методом экструзии материала (FDM). Образцы получали с использованием 3D-принтеров Ultimaker 2+ (для PLA, PETG, PP) и Anycubic 4MAX Pro 2.0 (для ABS). Режимы изготовления образцов (табл. 1) принимали на основе диапазонов, рекомендуемых производителем.

Таблица 1

Режимы изготовления образцов

Параметры	Материал			
	ABS	PETG	PLA	PP
Диаметр филамента, мм	1,75	2,85	2,85	2,85
Высота слоя, мм	0,20	0,20	0,20	0,20
Ширина линии, мм	0,27	0,27	0,27	0,27
Направление печати (по отношению к оси образца), град.	0	0	0	45
Скорость печати, мм/с	50	80	80	40
Температура стола, °C	95	75	60	80
Температура экструдера, °C	225	255	210	220

Предел прочности (σ) и модуль упругости (E) при растяжении и изгибе определяли по ГОСТ 11262-2017 и ГОСТ 4648-2014. Испытания проводили на универсальной разрывной машине Alfa Technologies Tensometer 2020, оборудованной термокамерой при температурах 25, 40 и 60 °C — для образцов из полимеров ABS, PETG и PP и 25, 40 и 55 °C — для образцов из полимера PLA.

На примере PLA приведены типичные кривые напряжение-деформация для термопластичных материалов при растяжении и изгибе при повышенных температурах (рис. 1).

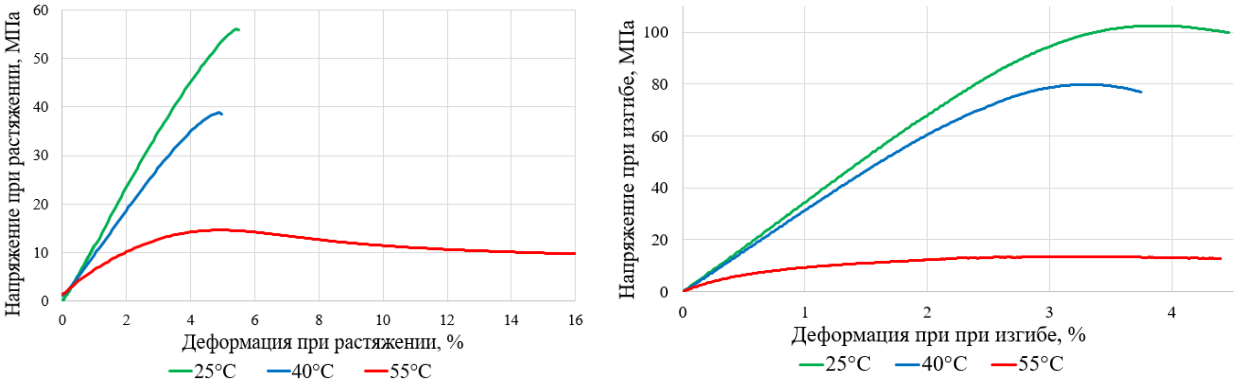


Рис. 1. Пример типичной кривой напряжение-деформация для образцов из PLA при повышенных температурах

Значения пределов прочности и модуля упругости (Юнга) при растяжении (σ_p , E_p) и изгибе (σ_n , E_n) приведены в табл. 2. Зависимости пределов прочности и модулей упругости при растяжении и изгибе образцов от температуры представлены на рис. 2.

Таблица 2

Характеристики материалов при растяжении и изгибе

Материал	25 °С		40 °С		60 °С (55 °С)	
	σ_p , МПа	E_p , ГПа	σ_p , МПа	E_p , ГПа	σ_p , МПа	E_p , ГПа
ABS	40,20	2,16	35,68	2,14	31,38	2,08
PETG	53,05	2,59	42,33	2,09	37,21	1,72
PLA	56,33	3,41	42,72	3,09	14,35	1,42
PP	10,87	0,21	7,72	0,10	4,43	0,03
	σ_n , МПа	E_n , ГПа	σ_n , МПа	E_n , ГПа	σ_n , МПа	E_n , ГПа
ABS	70,51	2,39	66,24	2,32	58,75	2,16
PETG	76,90	2,29	58,89	1,79	50,03	1,72
PLA	100,18	3,51	82,26	3,29	10,31	1,06
PP	5,81	0,22	5,40	0,14	3,00	0,09

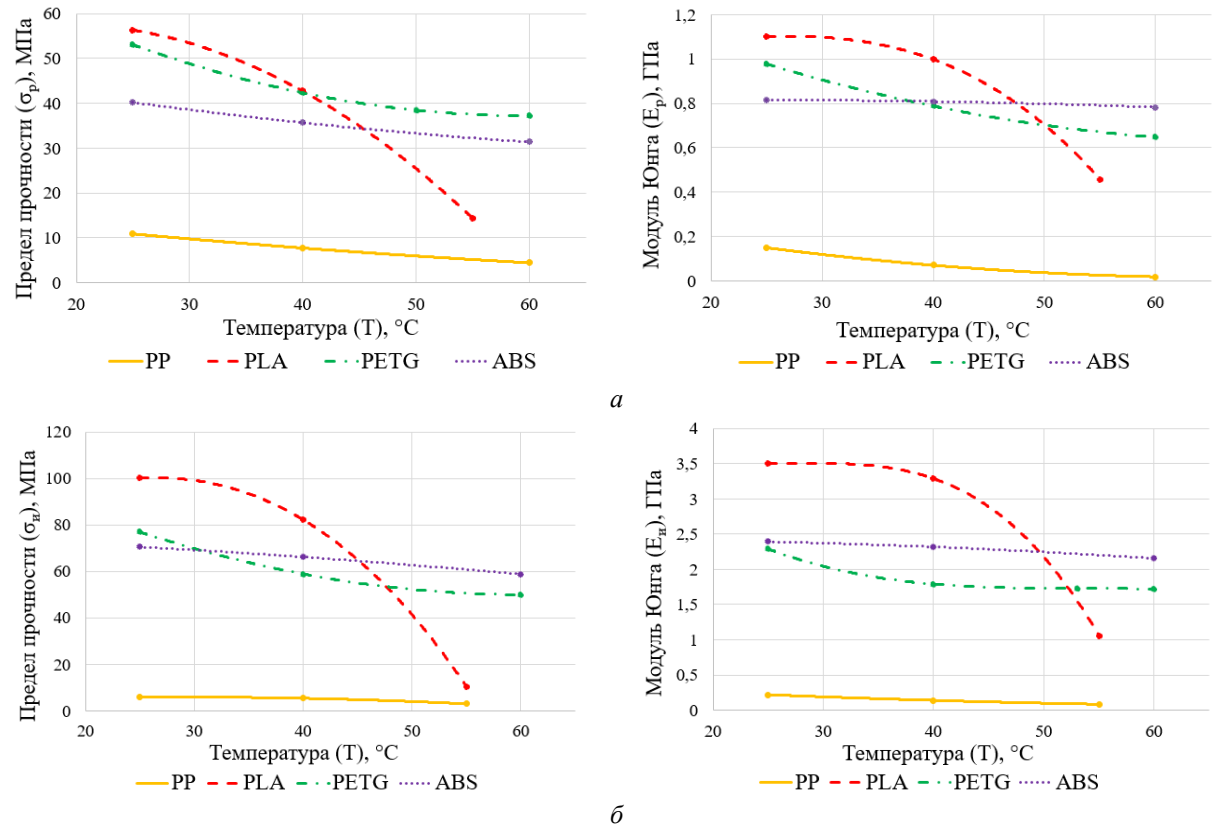


Рис. 2. Зависимость предела прочности и модуля упругости от температуры при растяжении (а) и изгибе (б)

Из рис. 3 видно, что зависимости являются типичными для термопластичных полимеров: с увеличением температуры модуль упругости и прочность как при растяжении, так и изгибе уменьшаются. Для ABS, PETG и PP выявлено постепенное ухудшение механических характеристик без резких скачков, для PLA установлено существенное снижение свойств выше 40 °С.

Для более полного представления о влиянии изменения внешней температуры в интервале от 25 до 60 °С на рис. 3а приведены данные по тепловому изменению не в абсолютных величинах механических свойств, а значения прочностных и упругих характеристик при той или иной температуре T , отнесённых к их величине, определённой при стандартной T , равной 25 °С.

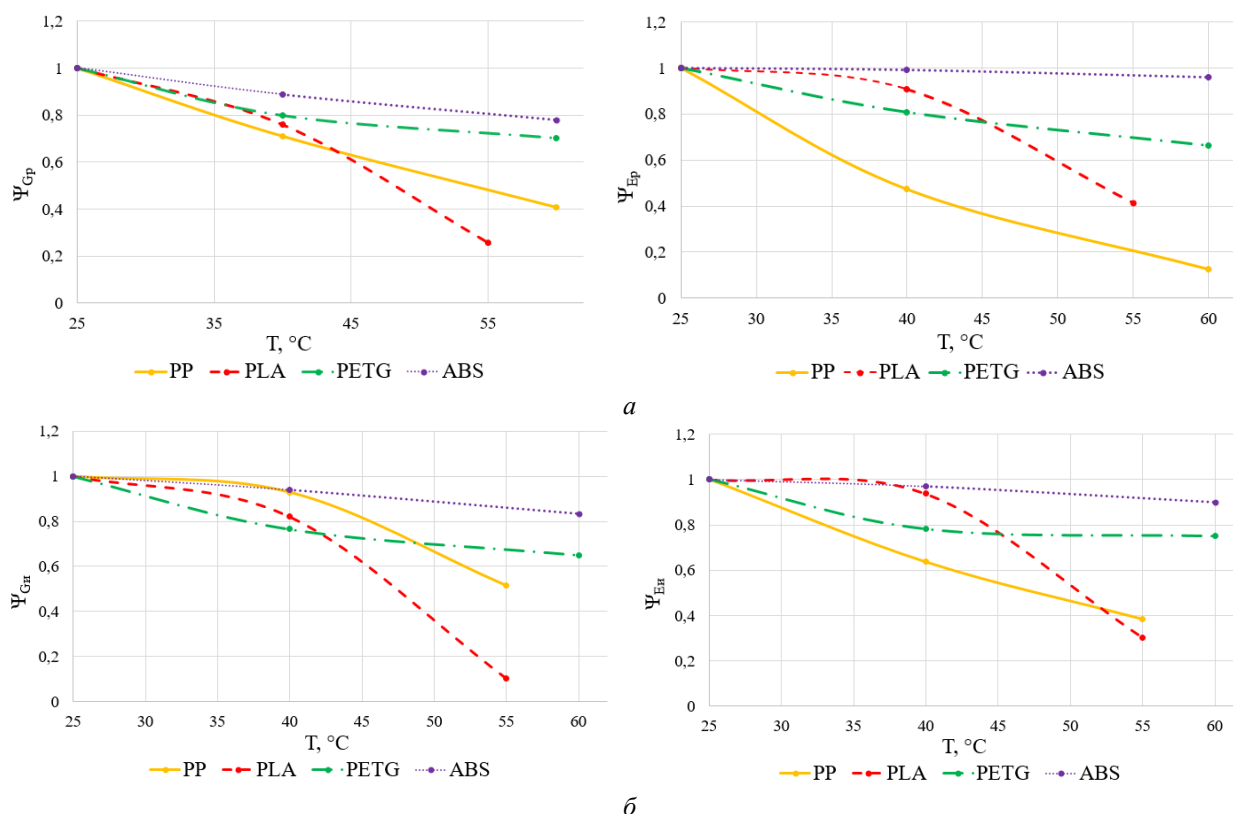


Рис. 3. Зависимость относительных предела прочности Ψ_{σ} и модуля упругости Ψ_E от температуры при растяжении (а) и изгибе (б)

На основе результатов, приведённых на рис. 3, видно, что среди всех исследованных материалов максимальной устойчивостью к воздействию повышенных температур (в плане изменения механических свойств) обладает ABS-пластик. Значительнее всего с ростом температуры снижаются механические характеристики у PLA и PP, причём если у PLA существенное снижение свойств происходит при 50 °С, то у PP значимое изменение модуля упругости происходит уже при 40 °С, то есть даже небольшой нагрев этого полимера приводит к снижению его способности сопротивляться внешним нагрузкам.

Суть исследования вязкоупругих характеристик при повышенных температурах заключается в приложении к образцу постоянной нагрузки и фиксировании его деформаций в течение длительного времени при постоянной температуре [7]. Температура испытаний для образцов из ABS и PP составляла 25, 40 и 60 °С, для PETG и PLA — 25, 40 и 50 °С, нагрузка — 30 % от разрушающей при соответствующей температуре. Однако в связи со значительным удлинением образцов из PETG и PLA даже при 10 % от разрушающей нагрузки при 60 и 55 °С принято решение снизить температуру экспериментов на 10 и 5 °С соответственно. В результате испытаний получали кривые ползучести при растяжении для исследуемых материалов — зависимость деформации от времени (рис. 4).

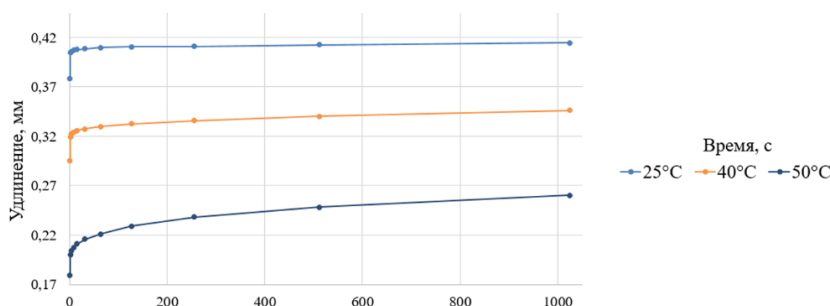


Рис. 4. Пример кривой ползучести для PETG при исследуемых температурах

Исходя из полученных значений удлинений и времени определяли параметры вязкоупругости: мгновенный (H) и длительный (E) модули упругости и время релаксации (n) (табл. 3). По полученным данным построены температурные зависимости вязкоупругих характеристик исследуемых полимерных материалов при растяжении (рис. 5).

Таблица 3

Вязкоупругие параметры при растяжении

Материал	25 °C			40 °C			60 °C (50 °C)		
	H , ГПа	E , ГПа	n , с	H , ГПа	E , ГПа	n , с	H , ГПа	E , ГПа	n , с
ABS	2,20	1,91	42,21	2,15	1,98	46,56	2,05	1,59	37,24
PETG	2,23	1,97	130,5	2,14	1,86	75,17	2,13	1,50	33,32
PLA	3,43	3,14	33,77	3,12	2,58	28,78	2,40	1,48	22,69
PP	0,248	0,141	19,27	0,159	0,083	17,53	0,054	0,026	16,17

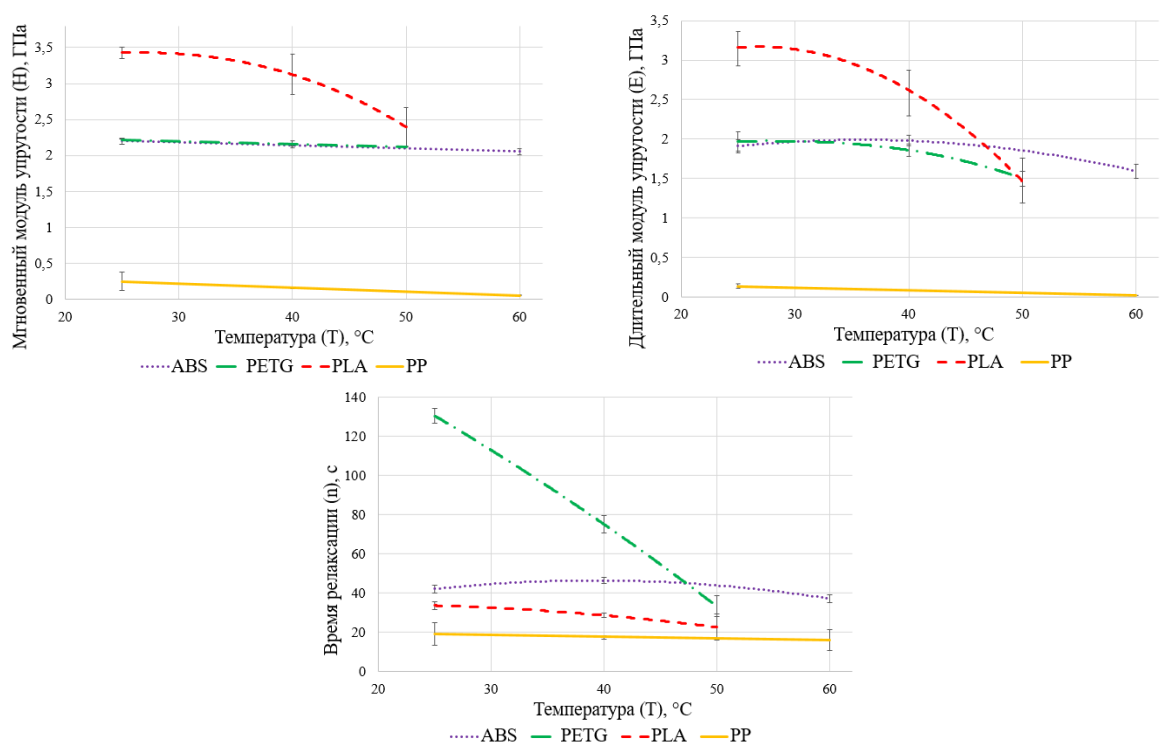


Рис. 5. Температурные зависимости параметров вязкоупругости от температуры при растяжении

Кривые зависимости относительных изменений вязкоупругих параметров от температуры окружающей среды по отношению к параметрам при стандартной температуре (25 °C) приведены на рис. 6.

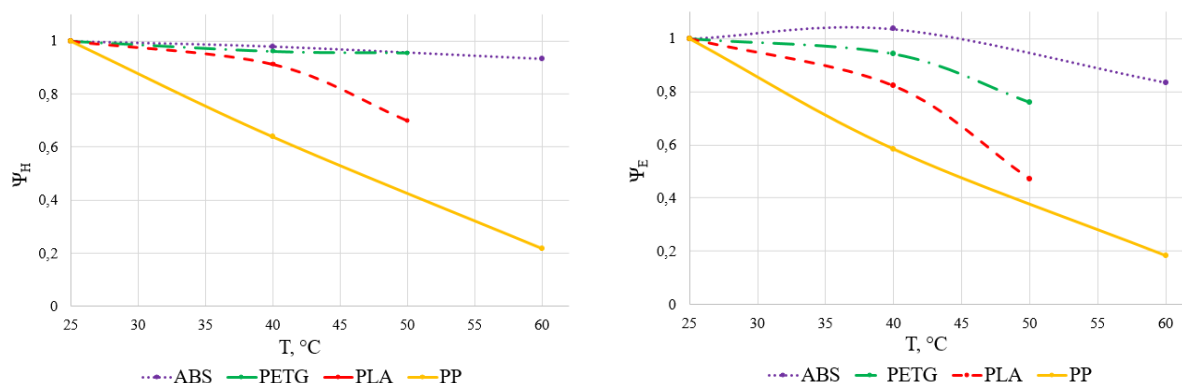


Рис. 6. Графики зависимости относительных мгновенного (H) и длительного (E) модулей упругости от температуры

Для образцов из ABS длительный модуль упругости при температуре 40 °C оказался выше, чем при 25 °C. Такой результат может объясняться дефектами печати и тем, что в этом полимере при данной температуре ещё не происходит смещений и деформаций молекулярных цепочек. Наиболее существенные изменения мгновенного и длительного модулей упругости выявлены у PP, у PLA значительные изменения наблюдаются при температуре 50 °C.

Выводы

Получены результаты экспериментальных исследований, на основании которых построены графики зависимостей пределов прочности и модулей упругости при растяжении и изгибе, мгновенных и длительных модулей упругости и времени релаксации при растяжении в зависимости от изменения температуры окружающей среды. Наглядно представлены их относительные зависимости по отношению к стандартной температуре T , равной 25 °C.

Список источников

1. Tanabi H. Investigation of the temperature effect on the mechanical properties of 3D-printed composites // International Advanced Researches and Engineering Journal. 2021. P. 188–193.
2. Grasso M., Azzouz L., Ruiz-Hincapie P. Effects of temperature on the mechanical properties of 3D-printed PLA tensile specimens // Rapid Prototyping Journal. 2018. P. 1337–1346.
3. Effects of high temperature and ultraviolet radiation on polymer composites / ed. Y. C. Ching [et al] // Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. 2019. P. 407–426.
4. Thermal-Mechanical Coupling Behavior of Directional Polymethylmethacrylate under Tension and Compression / H. Guo [et al]. Bethesda: Polymers, 2018.
5. Карпович О. И. Температурные зависимости вязкоупругих свойств вторичных термопластов и смесей на их основе // Труды БГТУ. 2009. С. 95–97.
6. Технические свойства полимерных материалов / В. К. Крыжановский [и др.]. СПб.: Профессия, 2003. 240 с.
7. Ставров В. П. Механика композиционных материалов: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 2008. 262 с.

References

1. Tanabi H. Investigation of the temperature effect on the mechanical properties of 3D-printed composites. *International advanced researches and engineering journal*, 2021, pp. 188–193.
2. Grasso M., Azzouz L., Ruiz-Hincapie P. Effects of temperature on the mechanical properties of 3D-printed PLA tensile specimens. *Rapid Prototyping Journal*, 2018, pp. 1337–1346.
3. Effects of high temperature and ultraviolet radiation on polymer composites. *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, 2019, pp. 407–426.
4. Ching Y. Ch., Gunathilake TMS U., Ching K. Y., Chuah Ch. H., Sandu V., Singh R., Liou N.-Sh. Thermal-Mechanical Coupling Behavior of Directional Polymethylmethacrylate under Tension and Compression. *Bethesda, Polymers*, 2018.
5. Karpovich A. I. Temperaturnye zavisimosti vyazkouprugih svoystv vtorichnyh termoplastov i smesey na ih osnove [Temperature dependences of viscoelastic properties of secondary thermoplastics and mixtures based on them]. *Trudy BGTU* [Works of BSTU], 2009, pp. 95–97. (In Russ.).
6. Kryzhanovsky V. K., Burlov V. V., Panimatchenko A. D., Kryzhanovskaya Yu. V. *Tekhnicheskie svoystva polimernykh materialov* [Technical properties of polymer materials]. Saint Petersburg, 2003. 240 p.
7. Staurov V. P. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of composite materials]. Minsk, BSTU, 2008, 262 p.

Информация об авторах

В. Г. Василевич — инженер;

О. И. Карпович — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой;

Г. А. Величко — студент.

Information about the authors

V. H. Vasilevich — Engineer;

A. I. Karpovich — PhD (Engineering), Associate Professor, Head of department;

R. A. Vialichka — Student.

Статья поступила в редакцию 05.04.2024; одобрена после рецензирования 10.04.2024; принята к публикации 12.04.2024.
The article was submitted 05.04.2024; approved after reviewing 10.04.2024; accepted for publication 12.04.2024.