

УДК 678.027.3:001.895

В.Г. Василевич, О.И. Карпович

ПРОЧНОСТНЫЕ И УПРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Представлены значения пределов прочности и модулей Юнга при растяжении и изгибе для термопластичных полимеров, используемых для 3D-печати, в зависимости от температуры. Построены зависимости прочностных и упругих характеристик от температуры.

Ключевые слова: аддитивные технологии, термопластичные полимеры, механические характеристики, предел прочности, модуль Юнга, температурные зависимости.

V.G. Vasilevich, O.I. Karpovich

STRENGTH AND ELASTIC CHARACTERISTICS OF POLYMER MATERIALS FOR 3D-PRINTING DEPENDING ON TEMPERATURE

This article contains the values of the tensile strength and Young's modulus in tension and bending for thermoplastic polymers used for 3D-printing, depending on temperature. Dependences of strength and elastic characteristics on temperature are constructed.

Keywords: additive technologies, thermoplastic polymers, acrylonitrile butadiene styrene, polylactide, polyethylene terephthalate glycol, polypropylene, mechanical characteristics, tensile strength, Young's modulus, temperature dependences.

В настоящее время большое количество изделий из полимерных материалов, изготовленных, в том числе, с использованием аддитивных технологий, эксплуатируют при повышенных температурах. Исследования зависимостей эксплуатационных характеристик от температуры для материалов аддитивного синтеза отсутствуют в литературе, приведены такие исследования только для полимеров, использующихся в традиционных технологиях переработки. Например, при температуре эксплуатации 60–80 °С термопластичные полимеры как полипропилен и полиэтилен теряют от 25 до 50 % своей прочности и жесткости при комнатной температуре [1, 2]. Однако данные о механических характеристиках при повышенных температурах необходимы для проектирования изделий, так как

характеристики полимерных материалов и композиций на их основе существенно зависят от температуры.

Цель работы – исследование влияния температуры эксплуатации на механические характеристики материалов, используемых для получения изделий методом аддитивного синтеза (экструзия материала) [3].

Для исследований использовали такие распространенные термопластичные полимеры, как акрилонитрилбутадиенстирол ABS-пластик (производитель Alphafilament), полилактид PLA (производитель REC), полиэтилентерефталатгликоль PETG (производитель SynTech), полипропилен PP (производитель Ultimaker).

Для изготовления образцов применяли технологию аддитивного синтеза, известную как экструзия материала. Образцы получали с использованием 3D принтеров Ultimaker 2+ (для PLA, PETG, PP) и Anycubic 4MAX Pro (для ABS). Режимы изготовления образцов (табл. 1) принимали из диапазонов, рекомендуемых производителем.

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 °С для образцов из полимеров ABS, PETG и PP и 25, 40 и 55 °С для образцов из полимера PLA.

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	0,25
Ширина линии, мм	0,27	0,27	0,27	0,27
Направление печати (по отношению к оси образца), °	0	0	0	45
Плотность заполнения, %	100	100	100	100
Скорость печати, мм/с	50	80	80	80
Температура стола, °С	95	75	60	80
Температура экструдера, °С	225	255	210	220

Значения прочности и модуля упругости (Юнга) при растяжении (σ_p , E_p) и изгибе ($\sigma_{и}$, $E_{и}$) соответственно приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Значения модуля Юнга и предела прочности при растяжении

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	0,82	35,68	0,81	31,38	0,78
PETG	53,05	0,98	42,33	0,79	37,21	0,65
PLA	56,33	1,10	42,72	0,99	14,35	0,46
PP	10,87	0,15	7,72	0,07	4,43	0,02

Таблица 3

Значения модуля Юнга и предела прочности при изгибе

Материал	25 °С		40 °С		60 °С (55 °С)	
	$\sigma_{и}$, МПа	$E_{и}$, ГПа	$\sigma_{и}$, МПа	$E_{и}$, ГПа	$\sigma_{и}$, МПа	$E_{и}$, 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

Данные об изменении прочностных и упругих характеристик полимеров в исследуемом диапазоне температур приведены в табл. 4.

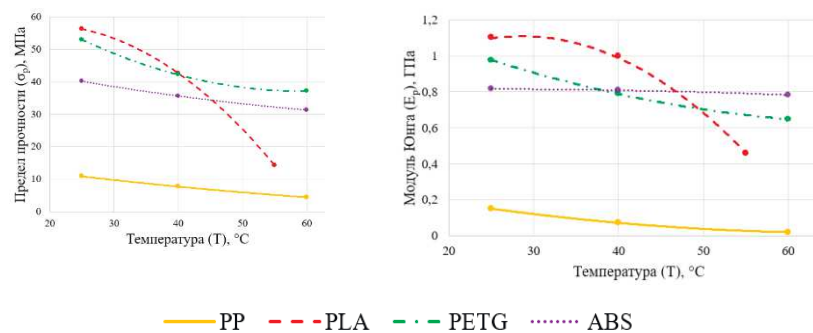
Таблица 4

Изменение прочностных и упругих характеристик материалов

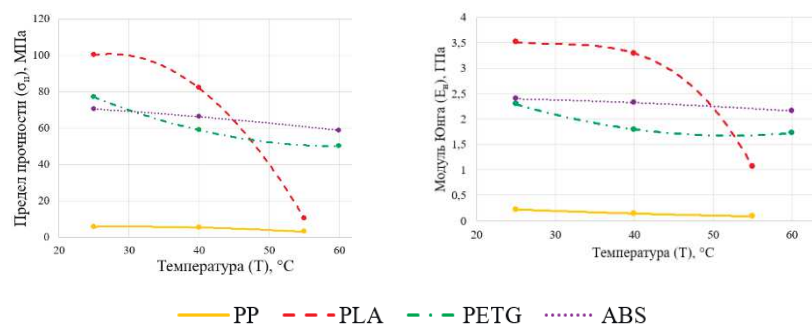
Материал	Растяжение		Изгиб	
	σ_p , %	E_p , %	$\sigma_{и}$, %	$E_{и}$, %
ABS	21,9	4,9	16,7	9,6
PETG	29,9	33,7	34,9	24,9
PLA	74,5	58,2	89,7	69,8
PP	59,2	86,7	48,4	59,1

По полученным данным строили зависимости предела прочности и модуля упругости от температуры (рисунок). Из него следуют типичные для термопластичных полимеров зависимости механических характеристик от температуры – 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 падение свойств, особенно выше 40 °С.



a



б

Рис. Зависимости прочности и модуля упругости от температуры:
a – при растяжении; *б* – при изгибе

Полученные данные можно использовать при проектировании изделий, изготавливаемых с использованием аддитивных технологий и эксплуатирующихся при повышенных температурах.

Список литературы

1. Технические свойства полимерных материалов / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. – СПб.: Профессия, 2003. – 240 с.

2. Технология полимерных материалов / под ред. В.К. Крыжановского. – СПб.: Профессия, 2011. – 533 с.

3. Mwema F.M., Akinlabi E.T. Fused Deposition Modeling: Strategies for Quality Enhancement. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. – 2020. – 78 p.

Об авторах

Василевич Валентина Геннадьевна – магистрант кафедры «Механика и конструирование», Белорусский государственный технологический университет, e-mail: va.valentina@bk.ru

Карпович Олег Иосифович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Механика и конструирование», Белорусский государственный технологический университет, e-mail: oll-123@rambler.ru