

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 3D-ПЕЧАТИ PLA ПЛАСТИКОМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗДЕЛИЙ**

*А. А. Савченя, канд. техн. наук, доцент А.И. Ермаков ФММП БНТУ, г. Минск*

*Резюме - в научной статье проводится выявление взаимосвязи технологических параметров 3D-печати и механических свойств получаемых изделий. При проведении исследований были получены регрессионные модели влияния параметров 3D-печати на механические характеристики изделия, отличающиеся патентной чистотой. На основании анализа регрессионных зависимостей выявлены оптимальные, с точки зрения механической прочности получаемых изделий параметры печати. В основе научной идеи лежит возможность с помощью варьирования технологических параметров 3D-печати PLA пластиком получить изделия с новыми механическими свойствами, которые возможно использовать в машиностроении, оборудовании для торговли и рекламы с целью экономии средств. Новизна данного исследования заключается в том, что при помощи полученных в исследовании данных можно будет прогнозировать свойства изделий, получаемых при различных режимах 3D-печати.*

*Ключевые слова: машиностроение, аддитивные технологии, 3D-печать, 3D-модель механические характеристики, PLA-пластик, полимолочная кислота, разрывная машина, прочность, растяжение, форма заполнения ячеек.*

**Введение.** Основными проблемами современного машиностроения является повышение надежности и долговечности деталей и узлов механизмов, наряду с постоянным снижением металлоемкости конструкций. Актуальность проблемы постоянно возрастает в связи с повышением требований к изготовлению изделий, необходимостью экономии дефицитных дорогостоящих металлов и сплавов и, как следствие, замены их на экономически более выгодные варианты. Одним из перспективных вариантов замены, является использование в конструкциях узлов пластиков, в частности, полимолочной кислоты (PLA). PLA – биоразлагаемый термопластик применяемый в 3D-печати [1].

Однако, не смотря на широкое распространение 3D-печати PLA пластиком, в открытом доступе практически отсутствуют данные о механических характеристиках изготавливаемых изделий. Не описан характер влияния температурного диапазона, скорости печати, высоты слоя, скорости перемещения печатающей головки на свойства изделий, что не позволяет прогнозировать механические свойства конечной продукции. Поэтому исследование режимов 3D-печати PLA пластиком влияющих на механические характеристики изделий представляет серьёзный научный и практический интерес [2].

**Основная часть.** Для установления механических характеристик изделия с различными технологическими параметрами, их необходимо подвергнуть серии испытаний, среди основных – испытания на разрыв. Испытания образца необходимы для установления прочности, что является особо важным параметром при дальнейшем его использовании. Данные испытания были проведены на гидравлической разрывной машине с измерительным программным комплексом в комплекте Kason WAW-300, где образец подвергался растягивающим усилиям до разрушения. Прибор, установленный на машине, определяет масштаб растяжения в виде диаграммы. Чем пластичнее образец, тем дольше его сопротивление разрушению, и наоборот [3]. Определение прочности образца при растяжении проводится согласно ГОСТ 11262, а определение модуля упругости – ГОСТ 9550-81. Спроектированная 3D-модель в программе SOLIDWORK и напечатанная на 3D-принтере, соответствует типу и размерам, указанным в ГОСТ [4]. В работе было использовано четыре типа формы заполнения: треугольный, сотовый, линия и печать на ребре. Был подобран оптимальный процент заполнения, он определяет какое количество пластика будет находиться внутри образца, выбор был остановлен на 20% [5]. Испытания на растяжение были проведены при температуре  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  в соответствии с ГОСТ 11262–80 и ГОСТ 9550–81. Перед испытаниями измерили ширину и толщину образцов в рабочей части с точностью до 0,01 мм в трех местах и вычислили площадь поперечного сечения. В расчет приняли наименьшую площадь поперечного сечения. Перед испытаниями на образец были нанесены необходимые метки (без повреждения образцов), ограничивающие его базу и положение кромок захватов. Образцы были закреплены в зажимы испытательной машины по меткам, определяющим положение кромок зажимов, таким образом, чтобы продольные оси зажимов и ось образца совпадали между собой и с направлением движения подвижного зажима. Зажимы затягивались равномерно, чтобы не было проскальзывания образца в процессе испытания, но при этом не происходило его разрушение в месте закрепления. Затем образцы нагружались возрастающей нагрузкой, скорости раздвижения зажимов составила 5 мм/мин при определении прочности и относительного остаточного удлинения. В момент разрушения фиксировалось усилие. Печать образцов проводилась при постоянной температуре сопла –  $215^\circ\text{C}$  и нагревательного столика –  $55^\circ\text{C}$ . Скорость печати – 60 мм/с.

По результатам испытаний были получены следующие данные:

Таблица 1 – Прочностные характеристики исследуемых образцов

Образец	№ повторения	Нагрузка	Напряжение	Зона пластичности	Предел упр.	Модуль упр.	Нагрузка	Напряжение	Зона пластичности	Предел упр.		
							Fm (Max, Farce), Кн		Fp, МПа		Среднее значение	
							Fm (Max, Farce), Кн		Fp, МПа		E, МПа	
Треугольник	1	10,9	27,25	0,71	17,75	0,41	1,11	27,75	0,74	18,42		
	2	1,11	27,75	0,74	18,5	0,46						
	3	1,13	28,25	0,76	19	0,33						
Соты	1	1,17	29,25	0,76	19	0,47	1,15	28,67	0,73	18,25		
	2	1,12	28	0,71	17,75	0,48						
	3	1,15	28,75	0,72	18	0,36						
Линия	1	1,02	25,5	0,67	16,75	0,46	1,08	26,92	0,68	16,5		
	2	1,1	27,5	0,7	17,5	0,32						
	3	1,11	27,75	0,67	15,25	0,38						
Ребро	1	1,62	40,5	0,96	24	0,53	1,53	38,25	0,90	22,42		
	2	1,35	33,75	0,77	19,25	0,41						
	3	1,62	40,5	0,96	24	0,53						

При испытании на растяжение лучше всего зарекомендовало себя продольное расположение волокон (ребро), в связи с тем, что оно наиболее приближено к исходным характеристикам материала и меньшее воздействие оказывают параметры, влияющие на склеивание слоев.

Тем не менее, следует отметить, что результаты, приведенные в таблице 1 справедливы только для нагрузки, приложенной перпендикулярно направлению волокон, в случае же приложения нагрузки вдоль волокна прочностные характеристики значительно снижаются, то есть существует сильная корреляция характеристик между направлением нагрузки и волокна.

**Закключение.** Полученные экспериментальные и теоретические данные могут быть использованы для углубления и корректировки существующих теоретических моделей, описывающих процессы 3D-печати. Кроме того, результаты работы могут применяться в учебном процессе при чтении лекций, проведении лабораторных, практических занятий, курсовом и дипломном проектировании. В перспективе результаты данного исследования можно будет использовать в промышленности при проектировании торгового оборудования, готовых изделий, производимых методом 3D-печать, в том числе на крупных предприятиях страны, таких как ОАО «МАЗ», ОАО «МТЗ», ОАО «АМКОДОР».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Информационный студенческий ресурс // НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА «КИБЕРЛЕНИНКА» [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/povyshenie-nadezhnosti-i-dolgovechnosti-detaley-i-uzlov-metallurgicheskogo-oborudovaniya>. – Дата доступа: 20.10.2019.
2. Ермаков, А.И. Разработка 3d- принтера для образовательных учреждений / А.И. Ермаков, В.В. Книга, Е.П. Мелещеня, А.А. Третьякова // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сборник статей III международной научно-практической конференции, Минск, 23–24 марта 2017 г. / БГАТУ; редкол.: В.Я. Груданов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 426–428.
3. Информационный студенческий ресурс // Гидравлические машины [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа: <https://www.ndt.by/product/mekhanicheskie-ispytaniya-materialov/elektromekhanicheskie-i-gidravlicheskie-universalnye-ispitatelnye-mashiny/universalnye-ispitatelnye-mashiny-serii-kason-gidravlicheskie-mashiny-kason-waw>. – Дата доступа: 05.11.2019.
4. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Метод испытания на растяжение (с Изменением N 1) // Электронный фонд [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-11262-80>. – Дата доступа: 13.02.2020.
5. Ермаков, А.И. Применение 3d- принтера для формирования изделий из шоколада / А.И. Ермаков, С.В. Чайко, А.Е. Шарамета, Е.П. Мелещеня // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сборник статей III международной научно-практической конференции, Минск, 23–24 марта 2017 г. / БГАТУ; редкол.: В.Я. Груданов [и др.]. – Минск, 2017. – С. 42–44.