

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИЛАКТИДА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МЕТОДАМ FDM-ПЕЧАТИ

Одинокова О. А., Драчев К. А.

*Тихоокеанский государственный университет (г. Хабаровск), РФ*

**Введение.** В настоящее время для получения изделий из полимерных материалов все большую популярность набирает так называемое аддитивное производство или 3D-печать. Благодаря аддитивным технологиям стало возможным получать объекты любой степени сложности и геометрии, при этом в разы сократить промежуток времени от идеи до конкретного изделия и существенно сократить трудоемкость, материалоемкость и энергоемкость, а также обеспечить экологически чистое производство. Исследовательская работа в области особенностей применения полимерных материалов в аддитивных технологиях остается весьма ограниченной и касается в основном АБС – пластика, изделия из которых используются в качестве демонстрационных образцов, а не в качестве функциональных рабочих изделий. В связи с этим исследование новых полимерных, в том числе композитных материалов, является актуальной задачей как в научном, так и в прикладном аспектах.

**Основная часть.** Для проведения исследований использовался 3D-принтер *Creality Ender 3 Pro* [1] (рисунок 1). Подающий механизм принтера выполнен по технологии «*Direct*», при которой материал подается напрямую в нагревательный блок, что позволяет печатать широким спектром термопластиков. Формообразование из легкоплавких материалов по методу *FDM* заключается в том, что прутковый материал в специальной камере нагревают до температуры размягчения и продавливают через печатающее сопло необходимого диаметра (в нашем случае – 0,4 мм). Печатающая головка перемещается в горизонтальной плоскости по заданной программе, нанося слои материала на предыдущие слои.



Рис. 1. 3D-принтер Creality Ender 3 Pro

Точность изготовления по такой технологии зависит от ориентирования конечного изделия в рабочем поле 3D принтера и варьируется от 0,1 до 0,3 мм. Точность по оси *Z* определяется прежде всего толщиной слоя и бывает обычно несколько ниже, чем по осям *X* и *Y*. Для достижения требуемых параметров качества поверхности, математическую модель будущего изделия ориентируют посредством программного обеспечения так, чтобы исполнительные поверхности, требующие большей чистоты, располагались вертикально (по оси *Z*), а менее значимые с точки зрения требований к качеству – горизонтально (оси *X* и *Y*).

Математическая модель образцов создавалась в системе *CAD* и записывалась в формат *STL*, после чего передавалась в программное обеспечение *Ultimaker CURA* [2], преобразующее созданную ранее трехмерную модель в управляющий машинный код (*G-code*), позволяющий принтеру изготовить деталь. Программа *CURA* ориентирует изделие, разбивает ее на горизонтальные сечения (слои) и рассчитывает пути перемещения печатающей головки. При необходимости автоматически генерируются поддерживающие конструкции для нависающих фрагментов изделия.

В качестве материала для исследования и последующего изготовления образцов использовался *PLA*-пластик (полилактид) от *Bestfilament*, являющийся биоразлагаемым, биосовместимым, термопластичным алифатическим полиэфиром, структурная единица которого – молочная кислота.

Необходимость проведения сравнительного анализа механических свойств полимерных материалов при растяжении и сжатии, особенно в области малых деформаций, ограниченных применением линейной суперпозиции, требует очень тщательной постановки эксперимента. Чтобы получить результаты требуемой точности, необходимо создать одинаковые условия при проведении механических испытаний на растяжение и сжатие. Следует отметить, что для правильного понимания явления ползучести в пластмассах испытания при сжатии не менее важны, чем при растяжении.

Для выявления физико-механических свойств термопластов на основе полилактида проведены испытания образцов на растяжение и сжатие в режимах ползучести. С этой целью использовалась установка с переключаемым реверсивным устройством, которое позволяет исследовать деформационные свойства при растяжении и сжатии на одном и том же образце в любой последовательности и без переустановок испытываемого образца и контрольно-измерительных приборов (рисунок 2).



Рис. 2. Установка для испытания на ползучесть в условиях растяжения-сжатия

Направление усилия, прикладываемого к реверсору, и направление перемещения всех движущихся элементов растяжной машины и реверсора остается без изменения как при растяжении, так и при сжатии. Таким образом, создаются совершенно идентичные условия для испытания образца в условиях осевого растяжения и сжатия. Вес нижней рамки реверсора компенсируется противовесами. Образцы для испытаний были изготовлены из полилактида со стопроцентным заполнением и различались направлением укладки слоев при печати (рисунок 3).

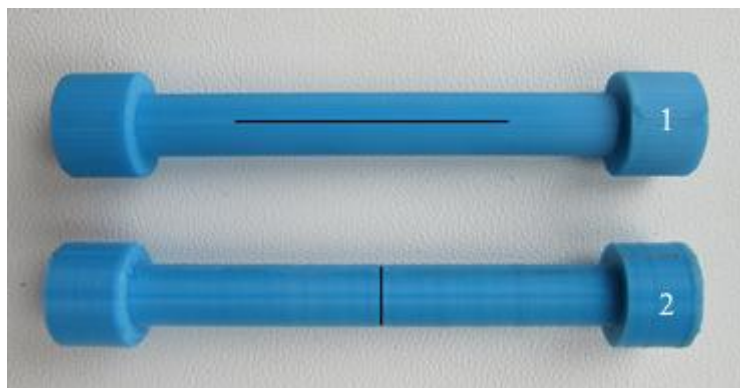


Рис. 3. Образцы для испытания на ползучесть (линия указывает на направление укладки слоев при печати образцов)

Испытаны образцы силой  $F = 10$  Н в установке, содержащей реверсор специальной конструкции [3], создающий идентичные условия при испытаниях на растяжение и сжатие. Температура испытаний  $20$  °С. Установленный в захватах реверсора образец плавно нагружался и производился последующий отсчет величины возникающей деформации. Интервалы времени для записи удлинения должны выбираться таким образом, чтобы в процессе испытания можно было полностью установить характер изменения удлинений. В наших исследованиях были приняты следующие временные интервалы измерения деформаций в минутах: 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16. По результатам испытаний были построены кривые ползучести в координатах «деформация  $\varepsilon$  – время  $t$ » при растяжении и сжатии (рисунок 4).

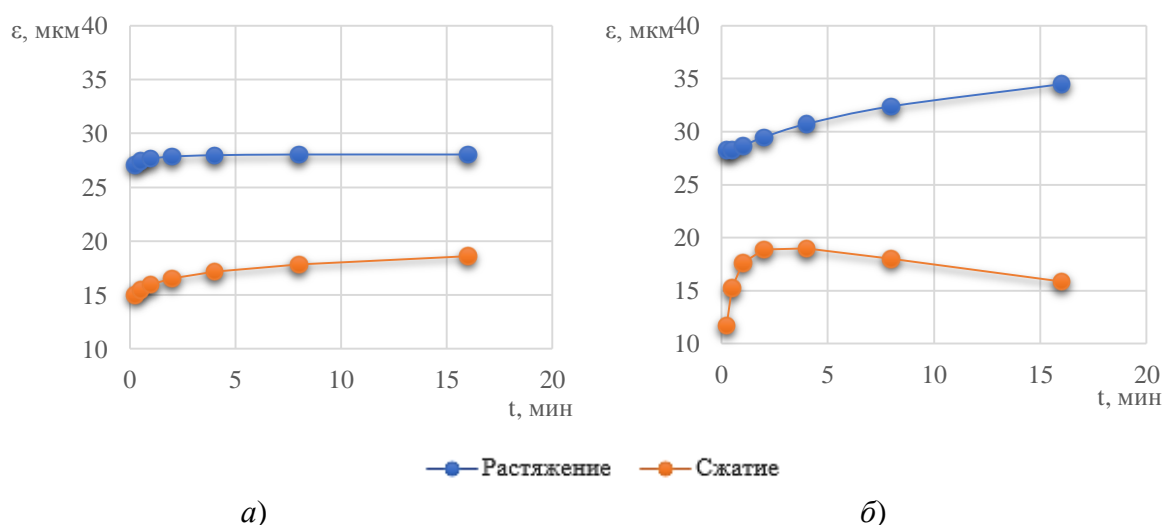


Рис. 4. Кривые ползучести: *а* – образец 1 с продольным расположением нитей; *б* – образец 2 с поперечным расположением нитей

На основе проведенных испытаний на ползучесть можно сделать следующие выводы: кривые ползучести полилактида при растяжении и сжатии носят монотонный характер; функция разномодульности как при продольной ориентации нитей, так и при поперечной вы выбранных значениях напряжения ( $\sigma = 0,1$  МПа), времени ( $t = 8$  мин) и температуры ( $T = 293$  К) также плавно возрастают (рисунок 5). Отсутствие на кривых разномодульности обоих образцов аномальных точек (максимумов или перегибов) свидетельствует об отсутствии опасного сточки зрения прочности напряжения. При увеличении значения времени, напряжения или температуры на функции разномодульности может возникнуть точка экстремума (предельное напряжение при сжатии) или точка перегиба (предельное значение напряжения при растяжении) [4].

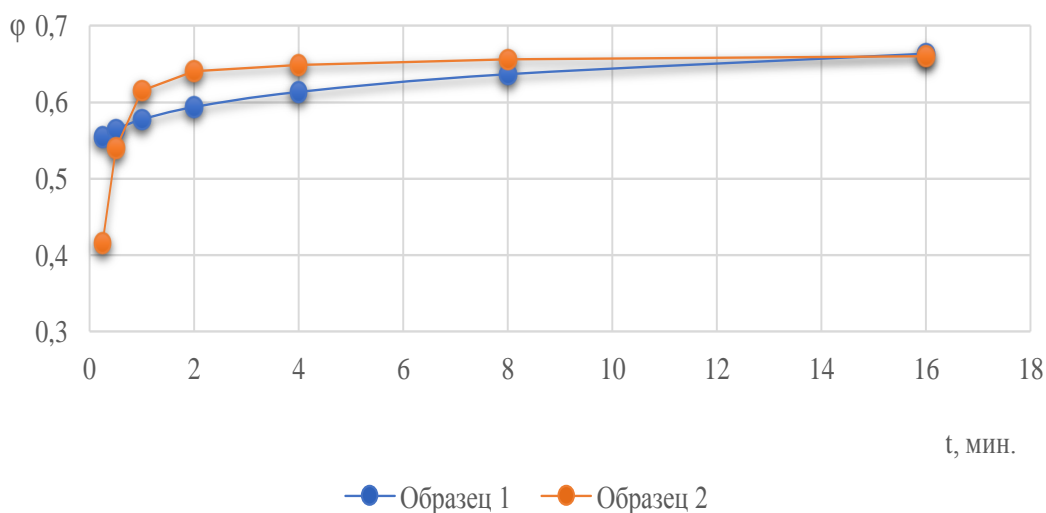


Рис. 5. Функции разномодульности: 1 – образец 1 с продольным расположением нитей; 2 – образец 2 с поперечным расположением нитей

Прочность при разрыве определяли по ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение», прочность при сжатии по ГОСТ 4651-2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие». Для проведения физико-механических испытаний были напечатаны стандартные образцы (лопатки) типа 1А по ГОСТ 11262-2017 в количестве 6 штук. Плотность заполнения (отношение заполненного пространства ко всему внутреннему объему модели) в значительной степени влияют на прочность модели, поскольку они определяют внутреннюю структуру печати. В связи с этим использовалось стопроцентное заполнение. Образцы отличались способом укладки слоев пластика относительно их продольной оси: образцы с укладкой слоев в продольном, поперечном и наклонном (под  $45^\circ$ ) направлении (рисунок 5). В качестве разрывной машины использовали универсальную испытательную электромеханическую машину «Shimadzu AG-X Plus». Определение прочности проводили при скорости перемещения подвижного захвата разрывной машины 25 мм/мин.

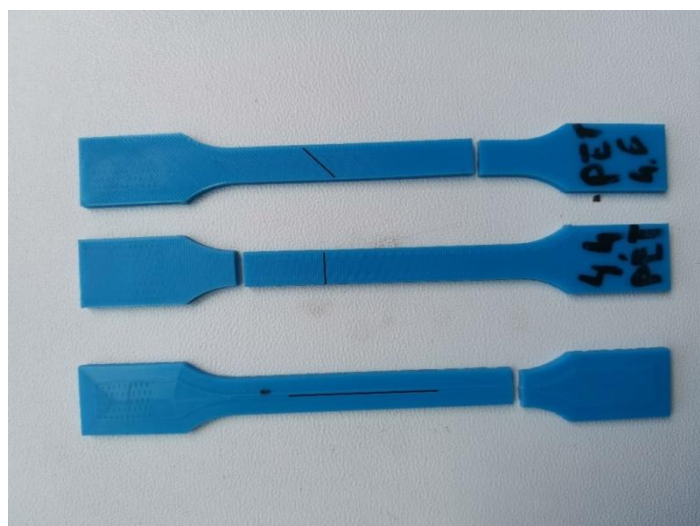


Рис. 5. Образцы после испытания на разрыв (сверху вниз: образец с наклонным расположением нитей относительно его длины, поперечном, продольном)

Результаты усредненных значений предела прочности для образца с продольным расположением нитей (слоев) составляют 56,17 МПа, для образца с поперечным расположением слоев – 58,4 МПа и для образца с наклонным расположением слоев – 63,45 МПа. Несмотря на различную ориентацию волокон образцов по отношению к направлению действия нагрузки предел прочности для всех образцов носит один и тот же характер: разрушение во всех случаях хрупкое, а разброс для  $\sigma_{np}$  во всех образцах составляет менее 13 %.

Для испытания на сжатие были изготовлены образцы цилиндрической формы диаметром 20 мм и длиной 30 мм. Аналогично с испытанием на растяжение, образцы имели разную укладку слоев (нитей) относительно их продольной оси. При этом и предельное напряжение при их сжатии совершенно различен для разной ориентации слоев (нитей), а также характер разрушения образцов, что видно на рисунке 6. Предел прочности для «продольного» образца составил в среднем 107,3 МПа (характер разрушения – «хрупкий»), а для «поперечного» – 82,85 МПа (характер разрушения – «пластичный»).

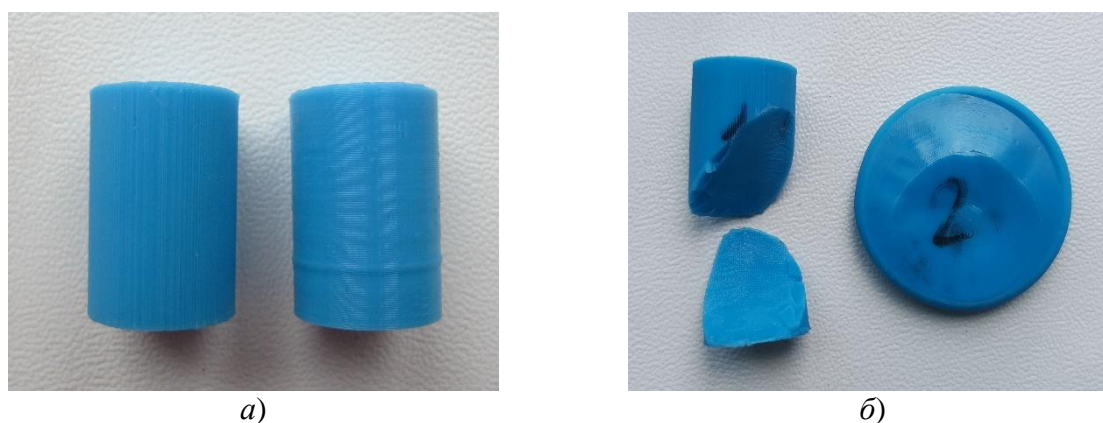


Рис. 6. Образцы для испытания на сжатие (слева образец с продольным расположением нитей относительно его длины, справа – поперечном): *а* – образцы до испытания; *б* – образцы после испытания

**Выводы.** Таким образом, можно сделать вывод, что для безопасного использования необходимо производить исследования как прочностных, так и деформационных свойств данного материала в условиях ползучести. Кроме того, необходимо произвести испытания на старение материала под воздействием атмосферных факторов. Также следует отметить, что, несмотря на использование одного пластика при изготовлении всех образцов, готовые изделия (образцы) получились с совершенно разными физико-механическими свойствами в зависимости от ориентации образующих их волокон.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Обзор 3D-принтера CREALITY Ender 3 Pro. URL: <https://top3dshop.ru/blog/3d-printer-creality-ender-3-pro-review.html>.
2. Ultimaker Cura: Powerful, easy-to-use 3D printing software. URL: <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>.
3. А. с. 356511 СССР, МКИ G 01 N 3/02. Универсальный реверсор для испытаний на растяжение-сжатие / О. А. Одинокова, В. В. Одинокоев, П. В. Мелентьев (СССР). 1972. Бюл. № 32. 3 с.
4. А. с. 890132 СССР, МКИ G 01 N 3/08. Способ определения характеристик ползучести образцов материалов / О. А. Одинокова, Ю. М. Даниловский (СССР). 1981. Бюл. № 46. 2 с.

*Поступила: 06.02.2022*