

Поверхность ПБТ проявляла гидрофобные свойства к водным растворам алкилполиглюкозида с концентрацией от  $1,98 \cdot 10^{-3}$  г/дм<sup>3</sup> до  $5,83 \cdot 10^{-3}$  г/дм<sup>3</sup> и краевые углы смачивания составляли 85–94 град. Однако, дальнейшее увеличение концентрации водного раствора алкилполиглюкозида до 0,01 г/дм<sup>3</sup> привело к снижению значений краевого угла смачивания до 75 град.

Таким образом, поверхность ПБТ может проявлять гидрофильные и гидрофобные свойства в зависимости от типа ПАВ и их концентрации в водном растворе. Полученные результаты могут быть использованы при флотационном извлечении ПБТ из смеси пластмасс.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hopewell, J. Plastics recycling: challenges and opportunities J. Hopewell, R. Dvorak, E. Kosior // *Philosophical Transactions of The Royal Society B Biological Sciences*. – 2009. – P. 2115–2126.

2. Левданский, А.Э. Флотационное разделение смеси измельченных полимерных отходов / А.Э. Левданский, Е.В. Опимах, А.А. Волненко, К.Б. Корганбаев, Д.К. Жумадуллаев. – Шымкент: Типография «Элем», 2020. – 152 с.

3. Pita F. Plastics floatability: Effect of saponin and sodium lignosulfonate as wetting agents / F. Pita, A. Castilho // *Polimeros*. – 2019. – Vol. 29. – № 3. – P. 1–9.

4. Ковалева А.А., Кулевец П.С., Левданский А.Э., Опимах Е.В. Экспериментальные исследования краевого угла смачивания полимерных материалов // *Химические технологии и техника: сборник материалов 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (Минск, 31 января – 12 февраля 2022 г.) [Электронный ресурс] / БГТУ. отв. за издание И. В. Войтов; УО «БГТУ». Минск, 2022. С. 156–158.*

УДК 678.073:004.925.84

**Кордикова Е.И., Шалай Е.Ю.**

(Белорусский государственный технологический университет)

### **МЕЖСЛОЙНЫЙ СДВИГ В ПЭТФ, ПОЛУЧЕННОМ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛОЙНОГО НАНЕСЕНИЯ РАСПЛАВЛЕННОГО МАТЕРИАЛА**

Технология послойной укладки расплавленной полимерной нити – FDM-печать (fused deposition modeling), в настоящее время является наиболее простой и востребованной в различных отраслях промышленности для изготовления функциональных изделий из полимерных и

композиционных материалов [1]. Это объясняется доступностью оборудования (от настольных до профессиональных принтеров) и материалов.

Изделия, напечатанные по технологии послойной укладки расплавленной полимерной нити, имеют ярко выраженную слоистость (рис. 1), величина которой в большей степени определяется толщиной слоя печати. Такие материалы по аналогии со слоистыми композитами, полученными по классическим технологиям, демонстрируют снижение механических показателей по отношению к монолитным изделиям полученным, например, методом литья под давлением [2].



**Рисунок 1 – Схема образования слоистости в напечатанном образце**

Эффект снижения свойств может быть обусловлен низкой адгезией между отдельными слоями при печати. Помимо этого, расслоение дает качественное понимание свойств готового напечатанного материала. В современной литературе недостаточно сведений для анализа данной проблемы.

Целью работы является изучение влияния основных параметров печати на значения модуля сдвига в плоскости печати, а также предела прочности и вида разрушения для материала, полученного по технологии послойного наплавления.

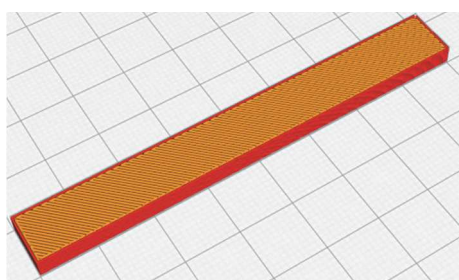
В качестве объекта исследования приняли полиэтилентерефталат гликоль (PETG) от производителя «Некрасовский полимер» (Российская Федерация), диаметр нити – 1,75 мм. Филамент перед печатью проходил цикл сушки в сушилке «eVOX Lite» при температуре 60°C в течение 3 часов.

Печать образцов осуществлялась на 3D-принтере с закрытой камерой Anycubic 4Max Pro, рабочей зоной 270×205×205 мм и диаметром сопла 0,4 мм, с параметрами печати, указанными в таблице 1.

**Таблица 1 – Параметры печати образцов**

Параметр	Значение
Высота слоя, мм	0,2
Заполнение, %	100
Направление печати, град	±45
Температура экструзии, °С	235, 240, 245
Температура стола, °С	70
Скорость печати, мм/с	30, 40, 50

Форма и размеры образцов для механических испытаний определялись ГОСТ 32659-2014 (ISO 14130:1997) и показаны на рис. 2.



3d модель



напечатанный

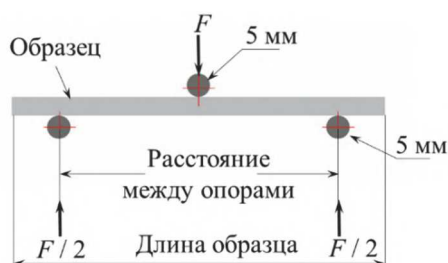
**Рисунок 2 – Вид образцов для испытаний по ГОСТ 32659**

Для проведения испытаний использовалась универсальная испытательная машина MTS Criterion 43 (MTS Systems, США) с автоматической записью диаграммы деформирования. Нагружение осуществляли по трехточечной схеме (рис. 3) с постоянной скоростью 2 мм/с.

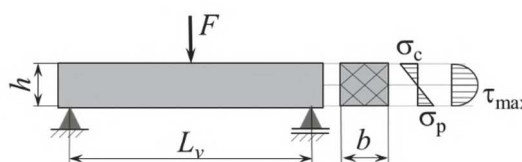
Нормальные и касательные напряжения, возникающие по высоте сечения (рис. 4), определяют по известным формулам [3]:

$$\sigma_{\max} = \frac{3 \cdot F \cdot L_v}{2 \cdot b \cdot h^2} \text{ и } \tau_{\max} = \frac{3 \cdot F}{4 \cdot b \cdot h},$$

где  $F$  – разрушающая нагрузка;  $b$  и  $h$  – размеры сечения образца;  $L_v$  – расстояние между опорами (база).

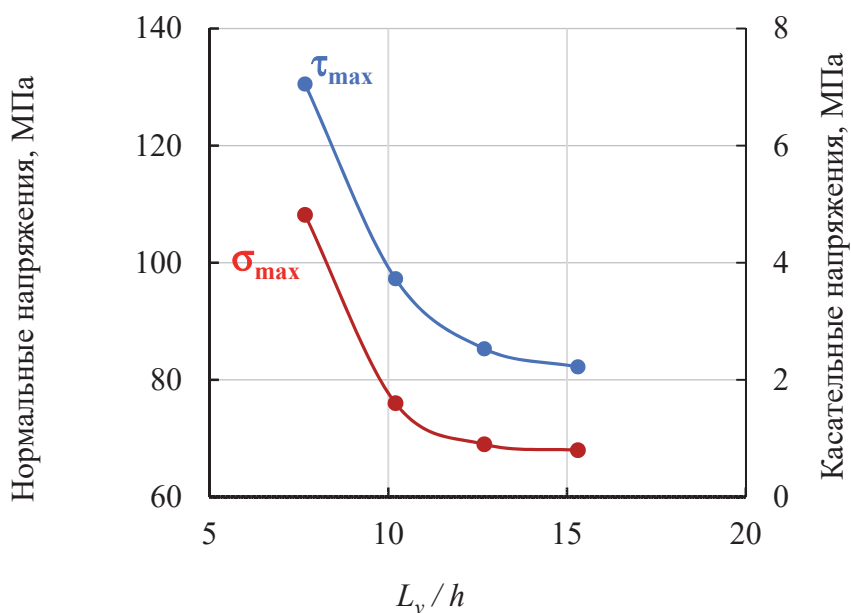


**Рисунок 3 – Схема нагружения**



**Рисунок 4 – Возникающие напряжения по высоте сечения  $b$**

Экспериментально установлено, что прочность межслойного сдвига не постоянна, а с увеличением относительного пролета  $L_v / h$  уменьшается (рис. 5).



**Рисунок 5 – Зависимость максимальных нормальных и касательных напряжений при изгибе от относительного пролета  $L_v / h$**

Результаты экспериментов показывают отсутствие разрушений от касательных напряжений – расслоение не наблюдается (рис. 6).



**Рисунок 6 – Вид образцов после испытания**



**Рисунок 7 – Области сжатия и растяжения при разрушении образца**



**Рисунок 8 – Перелом сжатых слоев при разрушении образца**

При малом расстоянии между опорами происходит смятие образца в области контакта с нагружающим устройством (рис. 7), при большом расстоянии между опорами увеличивается влияние растягивающих и

сжимающих напряжений, разрушение от нормальных напряжений сопровождается разрывом крайних растянутых волокон или переломом сжатых волокон (рис. 8).

В работе [3] предложена формула для расчета модуля межслоевого сдвига  $G$  в плоскости печати при трехточечном изгибе анизотропной балки:

$$G = \frac{1,2 \cdot (h/L_v)^2}{1/E_n - 1/E_{\text{раст}}},$$

где  $E_{\text{раст}}$  – истинный модуль упругости, определенный из испытаний на растяжение по ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) на образцах типа 1В с параметрами печати, указанными в таблице 1.

Полученные результаты эксперимента по определению модуля сдвига представлены в таблице 2.

**Таблица 2 – Модуль сдвига материала в зависимости от параметров печати**

Температура, °С	$E_{\text{раст}}$ , МПа			$E_n$ , МПа			$G$ , МПа		
	Скорость печати, мм/с								
	30	40	50	30	40	50	30	40	50
235	1927,4	1890,0	1914,3	1805,6	1771,9	1802,8	146,3	145,2	158,5
240	1979,4	1895,9	1890,8	1872,6	1802,6	1801,1	177,7	187,7	194,6
245	1971,1	1908,2	1916,6	1852,2	1792,6	1804,7	157,3	151,5	158,4

Модуль упругости при изгибе  $E_n$  вследствие межслойного сдвига оказывается меньше модуля упругости при растяжении  $E_{\text{раст}}$ .

Можно сделать вывод, что печать образцов в выбранном диапазоне температур и скоростей не оказывает существенного влияния на межслоевой сдвиг, хотя увеличение данного показателя при увеличении температуры составляет 20–22%, что может указывать на улучшение связи между слоями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко Р.В. Современные полимерные материалы и технологии 3D-печати / Журнал: «Вестник казанского национального исследовательского технологического университета», Номер 1, Том 18, 2015, с. 263-266
2. Болдырева А.А., Яруничева Ю.А., Дернакова А.В., Ивашов И.В. Прочность полимерного композита (стеклопластика) при межслойном сдвиге // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2(62) С. 42-50
3. Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Химия, 1981. — 272 с., ил.