

2. Jiyeon Oh, Sam Soo Kim, Jaewoong Lee, Chankyu Kang. Super-critical fluid flame-retardant processing of polyethylene terephthalate (PET) fiber treated with 9, 10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO): Changes in physical properties and flame-retardant performance // Journal of CO<sub>2</sub> Utilization, 2021, vol. 54. doi: 10.1016/j.jcou.2021.101761

3. Прокопчук, Н. Р. Наномодификация полиэтилентерефталата / Н. Р. Прокопчук, Л. А. Ленартович, Т. А. Вишневецкая, Ю. М. Можейко // Нефтехимия-2021: материалы IV Международного научно-технического форума по химическим технологиям и по нефтегазопереработке, 22–24 ноября 2021 г. – Минск: БГТУ, 2021. С. 104–106.

УДК 678.7.029

В.Б. Ходер, асп.;  
Е.И. Кордикова, канд. техн. наук, доц.;  
Г.Н. Дьякова, ассист. (БГТУ, г. Минск)

### **ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ПЕЧАТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВВЕДЕНИИ НАПОЛНИТЕЛЯ**

Аддитивное производство на современном этапе развития показывает себя как высокоэффективный промышленный сектор, открывающий высокий потенциал для сокращения времени цикла производства и затрат на разработку продукции [1]. Анизотропия свойств материалов в трехмерной печати вызвана послойным синтезом в процессе производства изделий, однако данный фактор минимизирован в технологиях фотополимеризации в ванне. Различия прочностных характеристик материалов, изготовленных в различных направлениях, в данном случае варьируется в пределах погрешности (5%) [2], что позволяет считать их условно изотропными.

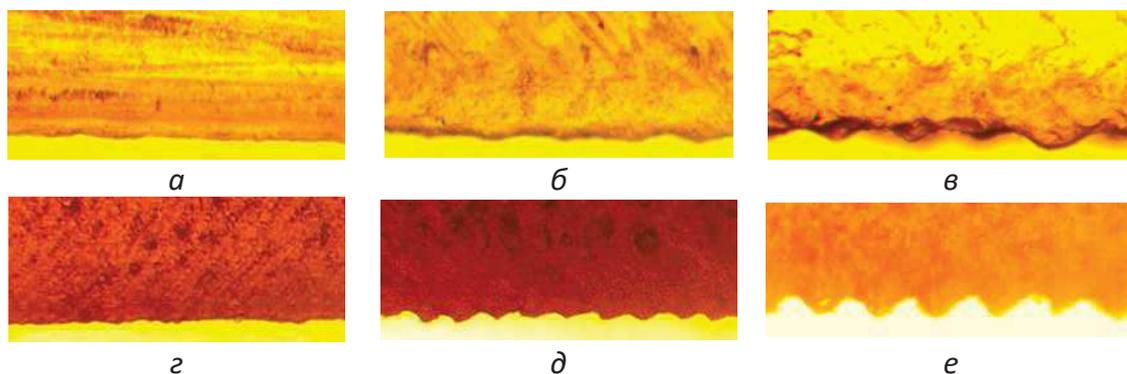
Вторым важным показателем, определяющим отличие прочностных и поверхностных свойств материала в различных направлениях, является высота слоя печати [3]. Материалы, используемые в технологиях, связанных с отверждением, представляют собой смесь олигомеров, мономеров и фотоинициаторов, а также добавок различного функционального значения [4]. Смолы для SLA-технологии, как правило, более жесткие и имеют большую точность построения контуров [5]. Соотношение компонентов обуславливает скорость прохождения реакции полимеризации и вариативность образования межмолекулярных связей на первичном этапе получения «зеленой» модели [6].

Оценивая особенности прохождения реакции фотополимеризации в ванне, можно предположить, что введение неактивных частиц наполнителя в жидкую фазу может позволить ограничить развитие поверхностных межмолекулярных связей. Это даст возможность снизить влияние толщины слоя печати на конечные физико-механические характеристики материала, а вместе с тем сократить производственный цикл. Целью работы является выявления степени влияния наличия наполнителя в фотополимерной системе на изменение физико-механических характеристик материала в зависимости от высоты слоя печати.

В качестве исходных компонентов для изготовления опытных образцов при исследовании механических характеристик применяли фотополимерную смолу Formlabs Clear и измельченные частицы отвержденной смолы Formlabs различных марок (Clear, Gray, White). Опытные образцы изготавливались в соответствии со стандартом ASTM D638-10 из исходного материала и наполненной композиции (20 мас. %) с размером частиц 40–50 мкм.

Синтез образцов производился на трехмерном стереолитографическом принтере Form 2 производителя Formlabs с ориентацией на рабочей поверхности под углом  $45^\circ$  ко всем осям координат. Высота слоя печати составляла 25, 50, 100, 140, 160, 300 мкм.

Постобработка образцов осуществлялась в соответствии с рекомендациями производителя: очистка в изопропиловом спирте в камере Form Wash 30 мин.; отверждение в УФ-камере Form Cure 60 мин при  $60^\circ\text{C}$ . Визуальное и микроскопическое исследование (рисунок 1) поверхности образцов показало, что наполнение системы частицами повышает шероховатость образцов, однако снижает слоистость структуры (граница слоев становится малоразличимой).

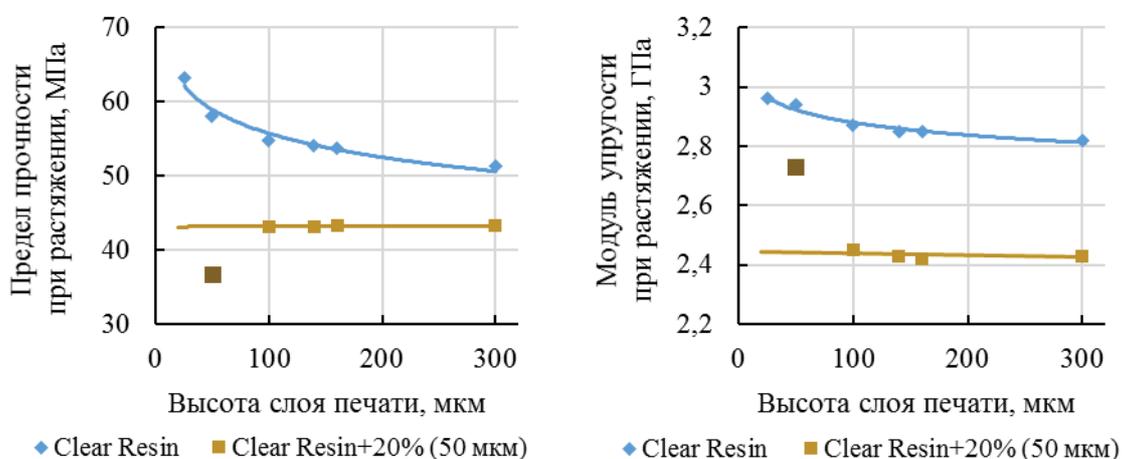


**Рисунок 1 – Микроскопическое исследование поверхности напечатанных образцов из Clear Resin (а–в) и Clear Resin + 20% (50 мкм) (z–e) при высоте слоя 50 мкм (а, z), 100 мкм (б, d), 160 мкм (в, e)**

Исследование поверхности и структуры образцов указывает на снижение ее шероховатости при уменьшении толщины слоя. При этом в образцах с толщиной слоя выше 100 мкм отсутствуют видимые следы слоев на боковой поверхности, а шероховатость обусловлена наличием частиц наполнителя на границе отвержденного материала.

Экспериментальные значения прочностных характеристик, полученных в результате растяжения, представлены на рисунке 2.

Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования выявил снижение прочностных показателей наполненной композиции от исходного материала. Однако отмечается отсутствие видимых изменений прочностных характеристик от высоты слоя печати при введении наполнителя в фотополимерную систему.



**Рисунок 2 – Прочностные (а) и упругие (б) характеристики при растяжении материала**

Образцы с высотой слоя 50 мкм для наполненной композиции показывают сильную дефектность поверхности, наличие раковин и трещин, что затрудняет адекватную оценку показателей при растяжении. Предположительно низкое качество образцов обусловлено сравнимым значением размера частиц наполнителя и высоты слоя печати.

Таким образом выявлено, что введение наполнителя в фотополимерные системы позволяет снизить слоистость структуры и избавиться от влияния высоты слоя печати на механические свойства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Upcraft S.; Fletcher, R. The rapid prototyping technologies // Rapid Prototyp. Journal – 2003. – Vol 23. – P. 318–330.
2. Senguen F.T. Validating Isotropy in SLA Additive Manufacturing // UV+EB Technology Journal. – 2018. – Vol. 4, No 2 (2) – P. 32–35.

3. Raju B.S. [et al]. Determining the influence of layer thickness for rapid prototyping with stereolithography (SLA) process // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2010. – Vol. 2(7). – P. 3199–3205.

4. 3D Printing / C. Schmidleithner, D.M. Kalaskar ed. by D. Cvetković London: IntechOpen, 2018. 196 p.

5. Ходер В. Б., Кордикова Е. И., Дьякова Г. Н. Наполненные фотополимерные композиции для 3D-печати методом стереолитографии (обзор) // Труды БГТУ: Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 1 (253). С. 27–32.

6. Munhoz A.L.J., Filho R.M. Infrared Laser Stereolithography // In: P. Bártolo (eds) Stereolithography. Springer, Boston, MA, 2011. 23 p.

УДК 678.073

А.Ф. Петрушеня, канд. техн. наук, доц.;  
О.М. Касперович, канд. техн. наук, доц.;  
А.В. Касперович, канд. техн. наук, зав. кафедрой ПКМ;  
Л.А. Ленартович, канд. техн. наук, доц.;  
А.Г. Любимов, канд. техн. наук, доц. (БГТУ, г. Минск);  
А.В. Сиразетдинов, асп. (КНИТУ, г. Казань, Российская Федерация)

### **ДИСПЕРСНЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ В СОСТАВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

Полимерные композиты с повышенной теплопроводностью широко используются в различных отраслях промышленности, в системах возобновляемой энергетики, в электронных системах, для скрытой прокладки силовых кабелей. Во всех этих устройствах выделяется большое количество тепла, которое необходимо отводить с целью продления их ресурса. Очевидно, что существует необходимость в усиленном отводе тепла в таких системах.

Полимеры обладают низкой теплопроводностью, около 0,1–0,5 Вт/м·К, и являются теплоизоляторами [1], что ограничивает их использование в приложениях, требующих повышенного теплоотвода. Как один из приемов повышения теплопроводности используют введение наполнителей различного типа с высокой теплопроводностью. Низко и средне наполненные полимеры имеют теплопроводность 0,3–2 Вт/м·К, что является низким значением для эффективного рассеивания тепла, необходимого для многих технических применений. Высоконаполненные композиты могут обладать теплопроводностью до 32 Вт/м·К, и, следовательно, могут быть эффективными, с практической