

теза алкидно-стирольных пленкообразователей и позволяет получать продукт, не уступающий аналогам.

### Литература

1. Каверинский В. С. «Зеленая химия» и лакокрасочная промышленность // Лакокрасочные материалы и их применение. М. : Изд-во «Пэйнт-Медиа», 2011. № 3. С. 12–16.

2. Mubofu, E. B. Castor oil as a potential renewable resource for the production of functional materials. Sustainable Chemical Processes, 2016, Vol 4, № 11, pp. 1–12. doi: 10.1186/s40508-016-0055-8.

3. Mutlu, H. & Meier, M. A. R. Castor oil as a renewable resource for the chemical industry. European Journal of Lipid Science and Technology, 2010, Vol. 112, pp. 10–30. doi: 10.1002/ejlt.200900138.

4. Лившиц Р. М., Добровинский Л. А. Заменители растительных масел в лакокрасочной промышленности. М. : Химия, 1987. 157 с.

5. Яблонская Е.И., Шутова А.Л., Витковская О.О. Подбор технологических режимов получения дегидратированного касторового масла. Химия и химическая технология в XXI веке : материалы XVII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени профессора Л.П. Кулёва, посвященной 120-летию Томского политехнического университета (г. Томск, 17–20 мая 2016 г.) / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – С. 580–581.

УДК 678.8

Скаскевич А.А., Судан А.  
(ГрГУ имени Янки Купалы)

### **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕПЛАСТИКОВ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ FFF-ПЕЧАТИ**

При использовании аддитивных технологий на предприятиях все стадии реализации проекта от идеи до использования (в любом виде – в виде прототипа или в виде готовой продукции) находятся в одной системе, в одной единой технологической цепи, в которой каждая технологическая операция также выполняется в цифровой CAD/CAM/CAE-системе. Производство полимерных изделий с привлечением адди-

тивных технологий позволяет управлять их эксплуатационными характеристиками [1].

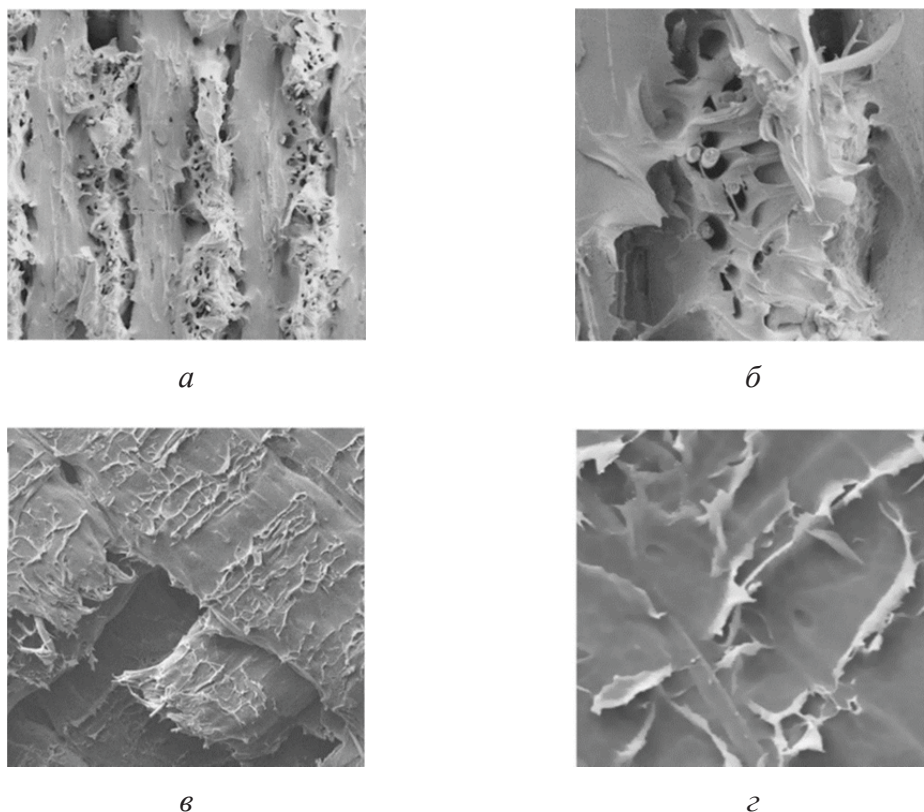
В качестве испытуемых материалов для исследования формирования структуры полимерных изделий использовали филамент диаметром 1,75 мм на основе углепластика УПА6-10, полученный в Институте химии новых материалов Академии наук Беларуси, на основе выпускаемого композита на ОАО «СветлогорскХимволокно». Предварительно полученный полимерный филамент подвергали термостатированию в сушильном шкафу при температуре  $95 \pm 5$  °С в течение 4 часов для снижения содержания влаги не более 0,01 мас.%. Параметры FDM-печати устанавливали в программе-слайсере CraftWare 1.19.

Исследования морфологических особенностей полимерных композиционных материалов осуществляли методом растровой электронной микроскопии на приборе SUPRA – 55WDS с системой рентгено-спектрального микроанализа INCA Energy 350 на стандартных образцах в виде лопаток тип 1 согласно ГОСТ 11262-2017 [2]. Образцы изготавливались послойной укладкой волокон расплавленного полиамида в горизонтальном положении. Плотность заполнения объёма образцов составляла 85 %.

Алгоритм построения структуры предусматривал укладку целого слоя в одном направлении с последующим изменением направления движения печатающей головки на  $90^\circ$  в следующем слое. Контур и внутренняя структура строились независимо (ориентация ячеек в плоскости продольного либо поперечного сечения образца определяется ориентацией образца на столе 3D-принтера при изготовлении), сопряжение заполнения и внешней стенки (оболочки) происходит при затвердевании расплава.

Представляло интерес исследовать механизм формирования аутогезионных связей между слоями полимерного изделия при изготовлении методом послойного наплавления. Полученные образцы полимерных изделий в виде лопаток с ориентацией печати  $\pm 45^\circ$  во внутрислоевом объёме были подвергнуты 5 % деформации при одноосном растяжении для дальнейшего исследования хрупких сколов образцов изделий, полученных в продольном оси растяжения направлении.

Проведен анализ морфологии поверхности хрупкого излома образцов лопаток на базе углепластика УПА 6/10, полученных FFF-печатью с ориентацией полимера  $\pm 45^\circ$  внутри слоев при заполнении объёма изделия, на РЭМ-изображениях поверхности, представленных на рисунке 1. Снимок поверхности образца в пределах межслоевого хрупкого скола показан на рисунке 1 а, где видно несколько смежных слоев волокон с ориентацией печати в слое под углами  $+45^\circ$  и  $-45^\circ$ .



**Рисунок 1 – РЭМ-изображения поверхностей хрупкого излома образцов с ориентацией печати  $\pm 45^\circ$ :**

- a* – общий вид морфологии поверхности излома образца в межслоевой локации (увеличение  $\times 100$ );**
- б* – крупный план поверхностных элементов в смежных слоях (увеличение  $\times 500$ );**
- в* – общий вид морфологии поверхности излома образца во внутрислоевой локации (увеличение  $\times 100$ );**
- г* – крупный план поверхностных элементов в пределах слоя (увеличение  $\times 500$ )**

На рисунке 1, *a* можно выделить несколько важных морфологических особенностей разрушения полимерного связующего: пустоты между слоями, возникающие в результате процесса 3Д-печати, слои с шероховатой морфологией поверхности разрушения и слои с более гладкой поверхностью. Для детального отображения характера контакта смежных слоев приведено увеличение области съемки (рис. 1, *б*). Представленные изображения свидетельствует о том, что между нитями между слоями характерна недостаточная адгезия вдоль оси растяжения, при котором происходит рост образовавшейся трещины. Так же может быть отмечена шероховатая поверхность излома в межслоевой области где отмечается фибрилляция полимерного связующего с образованием нитевидных фрагментов.

Такой характер разрушения углепластика УПА 6/10 позволяет предполагать, что перпендикулярно ориентированные к оси растяжения слои связующего затрудняют рост трещин. При этом участие оставшихся слоев материала в механизме сопротивления разрушения матрицы можно считать незначительным из-за недостаточной адгезии между ними, обусловленной ограниченной подвижностью связующего полимера, наполненного углеродными волокнами.

Также заметна роль коротких элементов углеродного волокна, содержащегося в матрице ПАб в процессе деформационного разрушения слоистой структуры изделия из углепластика. Фибриляция полимерной матрицы при одноосном растяжении угленасыщенного образца ПАб предполагает реализацию локального механизма упрочнения полимерной матрицы в изделии, сформированном методом FFF-печати.

При этом в пределах отпечатанного слоя наблюдается достаточно прочное аутогезионное сцепление во внутрислойной локации матрицы, наблюдаемое на изображении морфологии хрупкого излома образца (рис. 1 в). Это объясняется хорошими реологическими характеристиками ПАб, способствующими реализации явления аутогезии между нитями полимера в пределах печатаемого слоя [3]. На рисунке 1 г показано, что следы шероховатости поверхности излома сосредоточены вдоль коротких волокон. Такой факт подтверждает предположение о том, что короткие углеродные волокна способствуют усилению аутогезии в процессе FFF-печати полимерных изделий на основе углепластика.

## Литература

1. Skaskevich, A. A. Influence of technological parameters of FDM-print on the strength characteristics of samples of polyamide / A. A. Skaskevich, A. Sudan, D. Dzhendov // *Machines. Technologies. Materials.* – 2020. – Т. XIV. – № 5. – С. 210–212.

2. Национальный фонд ТНПА: Пластмассы. Метод испытания на растяжение [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/386650/553809>. – Дата доступа: 09.05.2020.

3. Судан, А., Губар, С.В. Особенности FDM-печати изделий на основе углепластика УПА 6-10 / А. Судан, С.В. Губар // *Актуальные вопросы физики и техники: сборник материалов X Республиканской. науч. конф. студ. магистр. и асп., Гомель, 22 апреля 2021 г.* / Под ред. Д.Л. Коваленко. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 199–201.