

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОЛИАМИДА 6 В ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ FDM-ПЕЧАТИ

*Скаскевич А. А., Гайдук А. Н.*

*Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,  
г. Гродно, Республика Беларусь*

Производство полимерных изделий с применением аддитивных технологий стало доступным благодаря интенсивному развитию производства FDM-принтеров, а также расходных полимерных материалов (филаментов), что позволяет решать различные задачи производства. В Республике Беларусь активно и эффективно применяют алифатические полиамиды и композиты на их основе для производства конструкционных изделий с высокими значениями потребительских характеристик самого широкого назначения. При этом переработка полиамидов в изделия и реализация преимуществ и достоинств указанного термопластичного полимера при использовании различных технологий затрудняются высокими значениями гигроскопичности (до 12 мас.% при допустимом значении при переработке 0,05–0,1 мас.%) и термической усадки (до 2,5 % для ненаполненных материалов) полиамида 6. Для активного применения полиамида 6 в аддитивных технологиях это является существенным недостатком, влияющим на качество получаемых изделий. И если с высокой склонностью к влагопоглощению переработчики полиамида эффективно справляются за счет предварительной сушки сырья и применения подогрева материала в загрузочной зоне технологического оборудования, то термическая усадка связующего требует более сложных решений. Чаще всего снизить термическую усадку полиамидной матрицы удается за счет ее модифицирования полимерными компонентами, а также путем введения дисперсных и (или) волокнистых наполнителей. При этом стеклянные волокна в составе полиамида 6 позволяют существенно повысить уровень деформационно-прочностных параметров изделий, а углеродные волокна увеличить ударную вязкость и износостойкость. Полиамид 6 и композиты на его основе в основном перерабатывают в изделия методами литья под давлением благодаря высоким значениям параметра текучести расплава. Применение ПА6 для FDM-печати в изделия представляется затруднительным по причине высокой текучести расплава (ПТР ПА6 210/310 более 20 г/10 мин), в связи с чем перспективным является использование композиционных составов на его основе для 3D-печати [1].

Таким образом, цель работы состоит в изучении особенностей формирования структуры композитов на базе полиамида 6 в изделиях, полученных методом послойного наплавления.

Для изучения особенностей формирования структуры материала в изделиях, полученных методом 3D печати, в данной статье авторы использовали полиамид ПА6-210/310 (Гроднамид) ТУ РБ 500048054.009-2001 в гранулах произ-

водства ОАО «ГродноАзот», а также углепластик УПА6-10 ТУ РБ 00204056-086-94 в гранулах производства ОАО «СветлогорскХимволокно». Для изучения параметров полимерных изделий получали филамент диаметром 1,75 мм на лабораторном экструдера Z-7М (Россия) в режимах, учитывающих реологические характеристики исходных материалов.

Исследования структуры материалов проводили методом сканирующей электронной микроскопии на хрупко разрушенных образцах напечатанных изделий (таблица 1). Полученные результаты обрабатывали методами математической статистики с применением табличного редактора Microsoft Excel 2010.

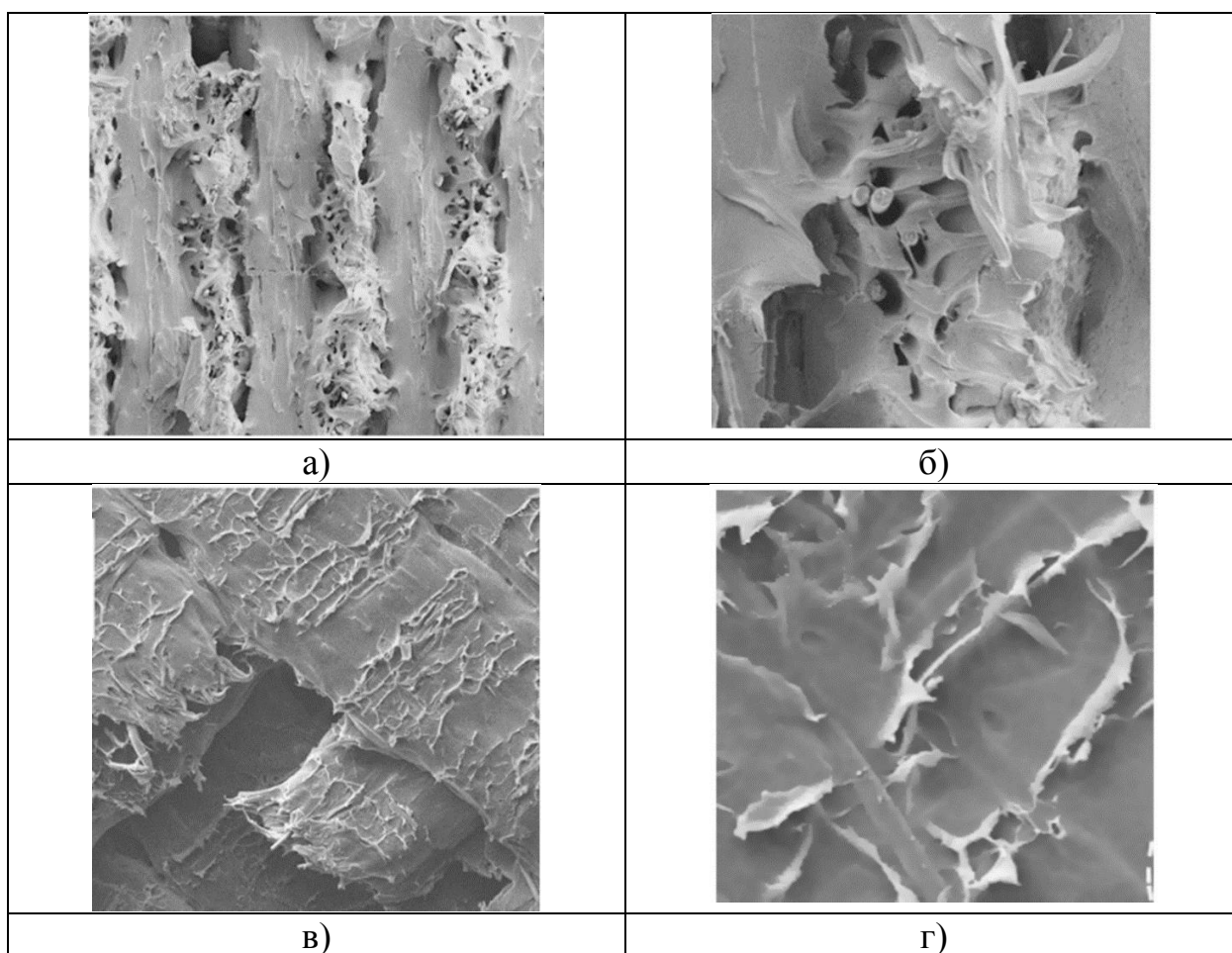
Таблица 1 – Параметры настроек печати исследуемых образцов

Основные параметры настройки печати	ПА 6	УПА 6–10
Скорость перемещения сопла экструдера при печати, мм/сек	40	20–60
Толщина слоя печати, мм	0,2	0,2
Ширина печати, мм	0,4	0,4
Количество слоев периметра изделия	6	6
Температура стола, °С	100	70
Температура экструзии, °С	250	250

Очевидно, полиамид 6 весьма чувствителен к технологическим условиям его переработки в изделия, что в процессах экструзии расплава в свободном состоянии проявляется в изменении геометрии изделия. Стабилизировать вязкостно-температурную зависимость материала при экструзии и последующей печати изделия можно за счет введения в состав ПА 6 наполнителей. Представляло интерес исследовать механизм формирования аутогезионных связей между слоями полимерного изделия при его изготовлении методом послойного наплавления. Полученные образцы полимерных изделий в виде лопаток с различным характером ориентации во внутрислоевом объеме ( $\pm 45^\circ$  и  $0^\circ/90^\circ$ ) 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 объема изделия, на РЭМ-изображениях поверхности, представленных на рисунке 1. Снимок поверхности образца в пределах межслоевого хрупкого скола показан на рисунке 1а, где видно несколько смежных слоев волокон с ориентацией печати в слое под углами  $+45^\circ$  и  $-45^\circ$ . На рисунке 1а можно выделить несколько важных морфологических особенностей разрушения полимерного связующего: пустоты между слоями, возникающие в результате процесса 3D-печати, слои с шероховатой морфологией поверхности разрушения и слои с более гладкой поверхностью. Для детального отображения характера контакта смежных слоев приведено увеличение области съемки (рисунок 1б). Представленные изображения свидетельствуют о том, что между нитями между слоями характерна недостаточная

адгезия вдоль оси растяжения, при котором происходит рост образовавшейся трещины. Также может быть отмечена шероховатая поверхность излома в межслоевой области, где отмечается фибрилляция полимерного связующего с образованием нитевидных фрагментов.



*а) 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  $\times 500$ )*

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

Представленный 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 [2, 3].

Также заметна роль коротких элементов углеродного волокна, содержащегося в матрице ПА6 в процессе деформационного разрушения слоистой струк-

туры изделия из углепластика. Фибриляция полимерной матрицы при одноосном растяжении угленаполненного образца ПА6 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 (рисунок 1в). Это объясняется хорошими реологическими характеристиками ПА6, способствующими реализации явления аутогезии между нитями полимера в пределах печатаемого слоя. На рисунке 1г 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.

Таким образом, результаты исследования указывают на перспективность проведения научных исследований в создании материалов на основе алифатических полиамидов и их композитов, а также изучения влияния технологических факторов процесса переработки полиамидных филаментов в изделия методом FDM-печати [4].

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ревяко, М. М. Теоретические основы переработки полимеров : учеб. пособие для студентов по специальностям «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий», «Упаковочное производство», «Машины и технология обработки материалов давлением» / М. М. Ревяко, Н. Р. Прокопчук. – Минск : БГТУ, 2009. – 305 с.

2. Межслойная аутогезия термопластичных материалов, применяемых в 3D-технологиях / А. В. Кравцевич [и др.] // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Я. Купалы. Серыя 6, Тэхніка. – 2017. – Т.7, №1. С. 66–74.

2. Tartakowski, Z. Właściwości mechaniczne wyrobów wytworzonych technologią FDM z poliamidu / Z.Tartakowski, K.Mydlowska // Przetwórstwo Tworzyw. – 2015. — № 6. P. 75–79.

3. Богданова, Ю. Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов : учеб. пособие / Ю. Г. Богданова. – М. : Изд-во МГУ имени М. В. Ломоносова, 2010. – 68 с.

4. 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.