

**ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ
СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА
ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА**

С.В. ПАНИН^{1,2}, Д.Г. БУСЛОВИЧ^{1,2}, Л.А. КОРНИЕНКО¹, Ю.В. ДОНЦОВ²

¹ ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,

² ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

E-mail: buslovichdg@gmail.com

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), обладая приемлемыми для полимеров характеристиками прочности, а также низким коэффициентом трения, высокой износо- и химической стойкостью в агрессивных средах, используется для изготовления узлов трения машин и механизмов. Кроме того, он нашел широкое применение в медицине в качестве компонентов ортопедических имплантатов. Однако из-за большой длины полимерных цепей СВМПЭ имеет близкий к нулю показатель текучести расплава [1], что существенно сдерживает возможности его переработки традиционными для полимеров методами (шнековая экструзия, литье под давлением и др.). Поэтому вопросы повышения технологичности (прежде всего, экструдиремости) СВМПЭ и композитов на его основе являются актуальными.

В последнее время активно проводятся исследования по использованию методов 3D-печати, а именно FDM (Fused Deposition Modelling), SLS (Selective Laser Sintering) и др. для изготовления изделий из СВМПЭ с использованием различных наполнителей/пластификаторов [2–4]. Показано, что пластификация СВМПЭ может быть достигнута путем добавления полипропилена, полиэтиленгликоля (ПЭГ), ПЭ высокого давления, привитого полиэтилена высокой плотности (HDPE-g-VTMS и HDPE-g-SMA) и др. С использованием таких экструдированных матриц, обладающих приемлемой текучестью расплава, далее можно получать высокопрочные и износостойкие композиты для аддитивных технологий производства изделий сложной формы.

В работах [4,5] показано, что приемлемый уровень текучести расплава композиций на основе СВМПЭ достигается при его наполнении пластифицирующими добавками в количестве не менее 10 вес. % в условиях сохранения сферолитной надмолекулярной структуры матрицы (при изготовлении материала методом компрессионного спекания). Методом компьютерного дизайна материалов, описанным в [5], было определено оптимальное соотношение пластифицирующих компонентов СВМПЭ с целью сохранения механических свойств и получения необходимой текучести расплава для использования композиции в FDM-печати (оптимальный состав полимер-полимерной композиции «СВМПЭ + 17 вес. % HDPE-g-SMA + 12 вес. % PP»).

Настоящая работа посвящена сравнительному анализу структуры и трибомеханических свойств экструдированного полимер-полимерного композита оптимального состава «СВМПЭ + 17 вес. % HDPE-g-SMA + 12 вес. % PP», полученного методом FDM-печати, а также горячим прессованием порошковой смеси и гранулята смеси.

В работе использовали порошок СВМПЭ марки GUR-2122 (Ticona, Германия) молекулярной массой 4,5 млн (в виде агломератов размером до 130 мкм с размером отдельных частиц 5-10 мкм); в качестве пластифицирующих добавок – привитый полиэтилен высокой плотности HDPE-g-SMA (молотый гранулят) и порошок полипропилена марки PP21030 (ПТР=3,0 г/10 мин). Смешение порошков для изготовления образцов методом компрессионного спекания (горячего прессования) проводили в планетарной шаровой мельнице МР/0,5*4 (ООО «Техноцентр», Рыбинск) с предварительным диспергированием компонентов в ультразвуковой ванне ПСБ-Галс 1335-05 (ЦУО ПСБ-Галс, Москва). С целью эффективного совмещения мелких (размером в десятки мкм) частиц СВМПЭ с крупными (сотни мкм) частицами полимерных наполнителей, дополнительно проводили их экструзионное жидкофазное смешение (компаундирование) в двухшнековом экструдере «Rondol» (10 mm Twin Screw Extruders, Microlab). Температура на выходе экструзионной

головки составляла $T = 210$ °С. Гранулы со средним размером 3-5 мм получали путем последующей механической рубки экструдата. Дополнительно, с целью получения крупнодисперсного порошка (размером 600-1000 микрон) для компрессионного спекания проводили механический помол гранулята на барабанном измельчителе «Rondol». Объемные заготовки полимерных композитов изготавливали: а) компрессионным спеканием трехкомпонентных порошковых смесей при давлении $P = 10$ МПа и температуре $T = 200$ °С в лабораторной установке на базе гидравлического пресса «МС-500» (ООО «НПК ТехМаш»), оборудованного размыкаемой кольцевой печью; скорость охлаждения заготовок без снятия давления составляла 5 °С/мин; б) компрессионным спеканием гранулята (исходного и молотого) трехкомпонентных смесей при тех же условиях; в) методом FDM (Fused Deposition Modeling) из гранул на лабораторном принтере ArmPrint – 2 (НИ ТПУ, Томск) с диаметром сопла микроэкструдера 0,4 мм; температура стола, верхней и нижней областей подачи филамента (гранул) составляла $T = 90, 160$ и 200 °С соответственно; скорость послойного нанесения и толщина наносимого слоя материала составляла 20 мм/с и 0,3 мм соответственно. Из полученных плиток размером 65×70×10 мм с помощью фрезерного станка с числовым программным управлением изготавливали образцы требуемой формы и размеров. Механические характеристики образцов определяли при разрывных испытаниях на электромеханической испытательной машине «Instron 5582» (Instron, Великобритания) при растяжении образцов в форме двойной лопатки. Объемный износ образцов в режиме сухого трения скольжения определяли по схеме «шар-по-дису» («Ш-п-Д») на трибометре CSEM CH2000 (CSEM, Швейцария) при нагрузке $P = 5$ Н и скорости скольжения $V = 0,3$ м/с. Радиус контртела в виде шарика из стали ШХ15 составлял 6 мм.

На основе проведенного сравнительного анализа трибомеханических характеристик многокомпонентных композитов, полученных различными методами, показано, что композит оптимального состава на основе сверхвысокомолекулярного ПЭ «СВМПЭ + 17 вес. % HDPE-g-SMA + 12 вес. % PP», полученный методом FDM-печати, по механическим свойствам превосходит аналоги, сформированные горячим прессованием исходных порошков и экструдированных гранул. Трибологические характеристики (износостойкость, коэффициент трения) хотя и немного уступают таковым для горячепрессованных из гранул, однако позволяют рекомендовать его в качестве фидстока для получения изделий триботехнического назначения для аддитивных технологий производства изделий сложной формы.

Список литературы

1. Tanzi M. C., Farè S., Candiani G. Foundations of Biomaterials Engineering / Edited by M. C. Tanzi, S. Farè, G. Candiani. Academic Press, New York. – 2019. P. 199-287.
2. Lanzillotti P., Gardan J., Makke A., Recho N. Strengthening in fracture toughness of a smart material manufactured by 3D printing // IFAC-PapersOnLine. – 2018. - №51. – P. 1353-1358.
3. Dizon J. R. C., Espera A. H., Chen Q., Advincula R. C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers // Addit. Manuf. – 2018. - № 20. – p. 44-67.
4. Ansari M. H. B. M., Ibrahim M. H. I. B. Thermal Characteristic Of Waste-Derived Hydroxyapatite (HA) Reinforced Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composites For Fused Deposition Modeling (FDM) Process // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. – 2016. - №165. – P. 012014-1 012014-15.
5. Люкшин Б.А., Шилько С.В., Панин С.В., Машков Ю.К., Корниенко Л.А и др. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения. - Ответственный редактор А.В. Герасимов. Новосибирск: Изд-во СО РАН Наука. – 2017. – 311 с.