

# МНОГОКОМПОНЕНТНЫЙ АНТИФРИКЦИОННЫЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ ЭКСТРУДИРУЕМОЙ МАТРИЦЫ “HDPE-g-VTMS-PP” ДЛЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Панин С.В.<sup>1,2,a</sup>, Буслевич Д.Г.<sup>1,2</sup>, Корниенко Л.А.<sup>1</sup>, Донцов Ю.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Томск, Россия

<sup>a</sup> [svp@ispms.tsc.ru](mailto:svp@ispms.tsc.ru)

В настоящее время в научной литературе активно проводятся исследования по использованию методов 3D-печати, а именно FDM (Fused Deposition Modelling) для изготовления изделий из полиолефиновых матриц (включая СВМПЭ) с использованием различных наполнителей/пластификаторов [1-5]. В качестве пластифицирующих наполнителей, помимо традиционно применяемых в промышленности процессинговых добавок, могут быть использованы совместимые с СВМПЭ коммерчески доступные полимеры. В частности, привитый полиэтилен высокой плотности (HDPE-g-VTMS и HDPE-g-SMA) [3]. С использованием таких полимерных пластификаторов, придающих смеси приемлемый уровень текучести расплава, можно формировать экструдируемые полимер-полимерные композиции на основе матрицы СВМПЭ с заданными характеристиками прочности и износостойкости для последующего производства изделий методом 3D-печати.

В [6] на основе экспериментально полученных результатов предложен алгоритм определения управляющих параметров (рецептура) при минимальном количестве экспериментальных данных, придающих требуемые (ограничительные) значения эффективным характеристикам полимер-полимерных композиций. Далее, на основе определенной рецептуры изготовлены и исследованы структура, трибологические и механические характеристики полимер-полимерных композитов на основе сверхвысокомолекулярной матрицы СВМПЭ, напечатанных методом FDM (экструзионная послойная печать).

Показано, что экструдируемые полимер-полимерные композиты на основе сверхвысокомолекулярной матрицы, полученные методом 3D-печати, по совокупности трибомеханических свойств превосходят аналогичные характеристики композитов, полученных компрессионным спеканием, что связано с формированием более однородной надмолекулярной структуры, прежде всего за счет двухшнекового компаундирования.

В настоящей работе на основе экструдируемой многокомпонентной полимер-полимерной матрицы на основе СВМПЭ изготовлены композиты, содержащие в качестве наполнителя стекловолокно размером 200 мкм. Исследованы триботехнические характеристики экструдируемых, высокопрочных и антифрикционных композитов, полученных 3D-печатью, с целью их использования в узлах трения машин и механизмов, работающих в различных условиях эксплуатации.

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). В качестве наполнителя использованы стекловолокна длиной 200 мкм в количестве 5 вес.%. Смешение порошков для изготовления образцов методом компрессионного спекания (горячего прессования) проводили в планетарной шаровой мельнице MP/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. 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.

Показано, что наилучшими прочностными характеристиками (модуль упругости, предел текучести и предел прочности) обладает композит, полученный методом FDM-печати. Триботехнические характеристики (коэффициент трения, объемный износ) композитов, полученных тремя способами, близки друг другу, что обусловлено армирующим наполнителем (стекловолокном), принимающим на себя сжимающие и сдвигающие нагрузки при трибонагружении и защищающие матрицу от изнашивания. Исследованный многокомпонентный композит на основе СВМПЭ рекомендован в качестве фидстока для получения антифрикционных изделий методом FDM-печати.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках плана фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013-2020 гг., а также поддержана грантом президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-5875.2018.8. Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку данных исследований, выполненных в рамках проектов № 19-38-90106 и 18-58-00037.

### Список литературы

1. S. Kurtz, “High Pressure Crystallized UHMWPEs,” in UHMWPE Biomaterials Handbook: 3rd Edition, edited by Steven M. Kurtz (William Andrew Publishing, Norwich, NY, 2016), pp. 434-448.
2. R. A. Borges, D. Choudhury, M. Zou, Tribology International 122, 1–7 (2018).
3. S.V. Panin, D.G. Buslovich, L.A. Kornienko, Yu.V. Dontsov, V.O. Alexenko, B.B. Ovechkin, AIP Conf. Proc. 2051, 020229 (2018).
4. M. S. Ramli, M. S. Wahab, M. Ahmad and A. S. Bala, Int. J. Adv. Manuf. Technol 11 (8), 5473-5480 (2016).
5. M. H. B. M. Ansari, M. H. I. B. Ibrahim, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 165, 012014 (2017).
6. S.V. Panin, D.G. Buslovich, L.A. Kornienko, V.O. Alexenko, Yu.V. Dontsov and B. B. Ovechkin, AIP Conf. Proc. 2141, 040011 (2019).