

МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЛОКОННО-АРМИРОВАННЫХ ПФА-КОМПОЗИТОВ ПРИ ЛИНЕЙНОМ ТРИБОКОНТАКТЕ В УСЛОВИЯХ СУХОГО РЕНИЯ

Шэнь Ю.¹, Буслович Д.Г.², Панин С.В.^{1,2}

¹НИ ТПУ, e-mail: shenyy1118@mail.ru

²ИФПМ СО РАН

Введение

Полифталамид (ПФА) – это новый тип термостойкого полуароматического полиамида (ПА), получаемого из терефталевой или изофталевой кислоты [1]. В настоящее время полифталамид наряду со высокоструктурированным полиэфиркетонем (ПЭЭК) и полифениленсульфидом (ПФС) составляют семейство термопластичных полимеров с выдающимися высокотемпературными характеристиками и превосходными механическими свойствами [2]. Высокая гибкость полимерных цепей ПФА, позволяющая вводить в состав композита до 40–50 вес. % волокнистых наполнителей (прежде всего углеродных и стекловолокон), обеспечивает возможность создания материалов с высокими прочностными свойствами, зачастую сопоставимыми с металлами. В силу высокой коррозионной стойкости и удельной прочности коммерческие марки волоконно-армированного ПФА позиционируются производителями для изготовления изделий автомобильной и аэрокосмической промышленности, электроники и пр.

Известно, что добавление углеродных и стеклянных волокон также может значительно повысить сопротивление изнашиванию композитов на основе термопластичных полимеров [3]. Это обусловлено тем, что армирующие волокна обладают высокой прочностью и жесткостью, что позволяет эффективно воспринимать нагрузку и, тем самым, снижать деформирование и износ термопластичной матрицы. Однако фрагменты разрушенных волокон, образующиеся при изнашивании, могут оказывать нерегулярное абразивное воздействие на поверхность трения полимерного композита, в то время как выступающие над этой поверхностью армирующие волокна могут регулярно царапать поверхность контртела [4]. По этой причине высокие механические свойства не всегда соответствуют высоким показателям их трибологических свойств.

Целью данного исследования являлось изучение механических и трибологических свойств композитов из полифталамида, армированных волокнами различной природы, содержания и длины.

Материалы и методики

Для изготовления образцов использовали гранулы ПФА (NHU N100, Bardowick Germany), а также гранулы ПФА, содержащие 30, 40 вес. % УВ, а также с 30 и 50 вес. % СВ (Xiamen Keyuan Plastic Co. Xiamen, China).

Механические характеристики исследовали в соответствии ASTM D638 при испытаниях на растяжение на электромеханической испытательной машине Instron 5582 при растяжении образцов в форме двойной лопатки в количестве 4. Твердость определяли на приборе Automatic Operating Stand Model 902 Instron (в соответствии со стандартом ASTM D2240).

Образцы для испытания изготавливались методом литья под давлением. Испытания по определению износостойкости проводились на машине трения 2070 СМТ-1 (ПО «Точприбор», г. Иваново) по схеме «вал-колодка» в соответствии со стандартом ASTM G 77–98. На образец действовала постоянная нагрузка $P = 60\text{--}180$ Н, а скорость скольжения задавалась равной $V = 0,3$ м/с. Контртелом в форме вала диаметром 35 мм было изготовлено из стали ШХ15.

Объемный износ оценивали по профилю дорожки трения при помощи профилометра Alpha-Step IQ (KLA-Tencor, США). Топографию поверхностей триботрекков изучали с помощью оптического микроскопа «Neophot 2» (Carl Zeiss, Германия), оборудованного цифровой камерой «Canon EOS 550D» («Canon Inc.», Токио, Япония).

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены сводные данные о механических свойствах ПФА и их композитов. Видно, что ненаполненный ПФА обладает хорошими механическими свойствами, прочность на растяжение и модуль Юнга составляют $97,7 \pm 6,9$ МПа и $3,3 \pm 0,1$ ГПа, соответственно.

При добавлении 30 вес% УВ (аспектное соотношение $AC = 200$) прочность на растяжение и модуль Юнга увеличивались до $142,7 \pm 12,5$ МПа и $12,9 \pm 0,6$ ГПа, соответственно. Введение идентичного количества 30 вес % СВ ($AC=200$) увеличение свойств было меньше: $113,1 \pm 9,7$ МПа и $9,0 \pm 0,3$ ГПа, соответственно. Это может быть связано с более высокой плотностью стекловолкна ($2,5$ г/мм³ по сравнению с КУВ – $1,75$ г/мм³), объемная доля которого при том же весовом содержании была меньше $17,4$ %, в то время как для КУВ – $24,8$ %.

В композитах с большим содержанием УВ и СВ, помимо количества, одновременно была большей длина армирующих включений: аспектное соотношение КУВ составляла 1000 при содержании 40 вес. % (30 об. %), в то время как для СВ аспектное соотношение было 445 при их содержании 50 вес.% (31,6 об.%). Предел прочности при растяжении и модуль Юнга композитов ПФА/40УВ составили $\sigma_U = 240 \pm 3$ МПа и $E = 33,7 \pm 1,9$ ГПа, в то время как в композите ПФА/50СВ: $\sigma_U = 207 \pm 1$ МПа и $E = 17,7 \pm 0,6$ ГПа, соответственно.

Таблица 1

Механические свойства чистого ПФА и композитов на его основе

№	Содержание наполнения, вес. %	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности на растяжение, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	Твердость по Шору D
1	ПФА-чистый	$3,31 \pm 0,09$	$97,72 \pm 6,91$	$147,6 \pm 16,8$	$12,3 \pm 3,1$	$79,4 \pm 0,3$
2	ПФА-УВ30	$12,79 \pm 0,56$	$142,72 \pm 12,47$	$250,3 \pm 18,6$	$44,5 \pm 7,3$	$77,7 \pm 0,5$
3	ПФА-УВ40	$33,67 \pm 1,85$	$240,00 \pm 3,00$	$394,0 \pm 11,0$	$55,8 \pm 4,5$	$82,1 \pm 1,2$
4	ПФА-СВ30	$9,01 \pm 0,28$	$113,14 \pm 9,70$	$172,2 \pm 13,5$	$21,6 \pm 4,1$	$76,7 \pm 0,6$
5	ПФА-СВ50	$17,65 \pm 0,55$	$207,00 \pm 1,00$	$264,0 \pm 6,0$	$51,5 \pm 2,9$	$80,5 \pm 1,3$

В целом проявились две четкие тенденции: при равном весовом содержании введение КУВ обеспечивало больший вклад в повышение прочности. Повышение аспектного соотношения КУВ и СВ в несколько раз также сопровождалось заметным увеличением механических характеристик. Подобные же тренды характерны для прочности на изгиб и ударной вязкости.

Далее были проведены испытания трибологических свойств ПФА и его композитов. Согласно данным, приведенным в рис. 1, наиболее высоким сопротивлением изнашиванию при минимальном коэффициенте трения $CoF = 0,23-0,24$ обладал композит ПФА/40УВ. При этом величина CoF практически не менялась при трехкратном повышении нагрузки, а увеличение значения WR не превышало 1,5 раз: $2,33-3,47 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н м. Величина CoF была в 1,5 раза выше в композите ПФА/50СВ $0,32-0,37$, при практически стабильной величине $WR = 3,36-3,81 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н м. При меньших степенях наполнения (и меньшей длине волокон) композиты обладали кратно более низкими трибологическими свойствами.

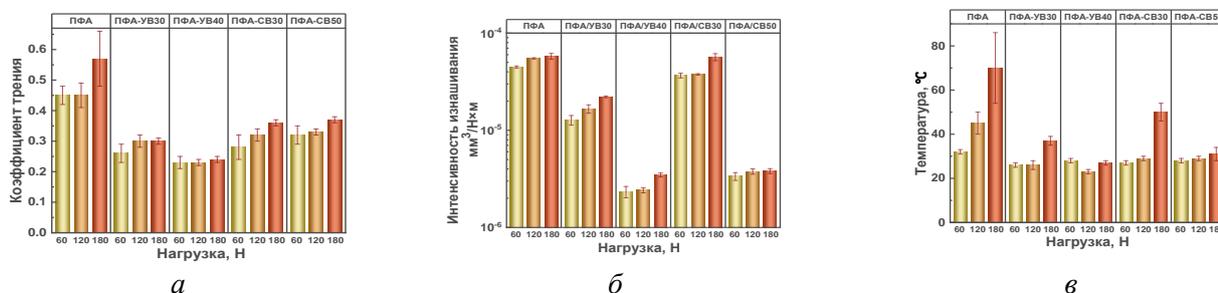


Рис. 1. Диаграммы трибологических свойств (а) коэффициента трения, б) интенсивности изнашивания, (в) температуры при разном уровне нагрузки; вал-колотка; сухое трение; контртело ШХ15

Заключение

В работе исследованы механические и трибологические свойства полифталамид и его композитов, армированных волокнами различных типов (углеволокон, стекловолокон), содержания и длины.

Показано, что длинные углеволокон в ПФА/УВ40 обеспечивают наилучшие механические свойства этого композита.

Установлено, что композиты ПФА/УВ40 и ПФА/СВ50 с большими АС имеют низкую интенсивность изнашивания и стабильные коэффициенты трения при высоких нагрузках. Это доказывает, что оба состава композитов обладают способностью работать в широком диапазоне условий эксплуатации $P \cdot V$ (нагрузка \cdot скорость).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема FWRW-2021-0010.

Список литературы

1. Gonzalez de Gortari M., Misra M. and Mohanty A.K. Polyphthalamide polymers: A review on synthesis, properties, and advance manufacturing and emerging applications // Journal of Applied Polymer Science. – 139. – 40, 2022. – e52965.
2. Pini N. et al. Perspectives for reactive molding of PPA as matrix for high-performance composite materials. J. Thermoplast. // Compos. Mater. – 2006. – 19(2). – P. 207–216.
3. N. Ma. et al. Tribological behavior of polyetheretherketone composites containing short carbon fibers and potassium titanate whiskers in dry sliding against steel // J. Appl. Polym. Sci. – 2012. – Vol. 123, № 2. – P. 740–748.
4. Panin, S.V. et al. Effect of Tribological Layer Formation on Wear Resistance of PI and PEI-Based Nanocomposites in Point and Line Contacts // Appl. Sc. – 2023. – 13. – 3848.