

**МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИТОВ  
НА МАТРИЦЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

*С.В. ПАНИН<sup>1,2</sup>, АЛЕКСЕНКО<sup>1,2</sup>, Л.А. КОРНИЕНКО<sup>1</sup>, Н.Н. ВАЛЕНТЮКЕВИЧ<sup>2</sup>, Л.Р. ИВАНОВА<sup>1</sup>*

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

<sup>2</sup>Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,  
e-mail: [svp@ispms.tsc.ru](mailto:svp@ispms.tsc.ru)

Антифрикционные полимерные композиционные материалы широко применяются в составе узлов трения и в качестве уплотнительных элементов в различных видах современной техники и медицине, определяя их надежность и долговечность. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) занимает особое место среди полимерных смол благодаря хорошим деформационно-прочностным показателям, низкому коэффициенту трения и высокой износостойкости, химической стойкости к агрессивным средам, широкому температурному интервалу формостабильности [1-3]. Этот комплекс свойств позволяет применять СВМПЭ в изделиях, обладающих стойкостью к удару, растрескиванию и истиранию. Выбором наполнителей можно целенаправленно изменять функциональные свойства и расширять область использования СВМПЭ в машиностроении, химических технологиях, сельском хозяйстве и других областях техники. При разработке композиционных материалов на основе СВМПЭ, как правило, ориентируются на преимущественные условия их эксплуатации: сухое трение, трение в режиме граничной смазки, абразивный износ. Поэтому разработка трех- и более компонентных композитов на СВМПЭ-матрице позволяет одновременно повысить прочностные свойства композитов и износостойкость за счет введения в композицию твердосмазочных наполнителей. В частности, углеродные микроволокна позволяют обеспечить повышение модуля упругости, предела текучести и предела прочности, а мелкодисперсный политетрафторэтилен обеспечит наличие твердосмазочных включений внутри композита, с последующим их внесением в зоны трибоконтакта при эксплуатации.

В настоящей работе исследованы механические и триботехнические характеристики двух- и трехкомпонентных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного короткими углеродными волокнами и мелкодисперсным политетрафторэтиленом в условиях различных нагрузок и скоростей скольжения (60 Н×0,3 м/с, 60 Н×0,5 м/с, 140 Н×0,3 м/с, 140 Н×0,5 м/с).

Использовали порошок СВМПЭ фирмы Ticona (GUR-2122) молекулярной массой 4,0 млн. и размером частиц 5÷15 мкм, порошок ПТФЭ марки «Флуралит» размером <3 мкм, короткие углеродные микроволокна средней длиной ~65 мкм (Ø 7,5 мкм).

Механические характеристики определяли при разрывных испытаниях на электромеханической испытательной машине Instron 5582 при растяжении образцов в форме двойной лопатки (ГОСТ 11262-80). Испытания на износостойкость проводили на машине трения 2071 СМТ-1 по схеме «вал-колодка». Для исследования поверхностей испытанных образцов использовали оптический профилометр New View 6200 (Zygo). Надмолекулярную структуру композитов наблюдали с помощью растрового электронного микроскопа LEO EVO 50 (Carl Zeiss) при ускоряющем напряжении 20 кВ на поверхностях скола образцов с надрезом, механически разрушенных после выдержки в жидком азоте.

Исследованы механические свойства и надмолекулярная структура двухкомпонентных композитов на основе СВМПЭ с различным содержанием мелкодисперсного политетрафторэтилена (флуралита) с целью определения оптимального его содержания в композиции в условиях сохранения сферолитной надмолекулярной структуры и минимального снижения прочностных свойств СВМПЭ. Показано, что оптимальным (достаточным) содержанием указанного наполнителя следует считать 5 вес. %.

В таблице 1 приведены механические характеристики трехкомпонентных композитов на основе СВМПЭ с различным содержанием углеродных волокон.

Таблица 1

| Наполнители, вес. %      | $\rho, \text{г/см}^3$ | Шор $D$  | $E, \text{МПа}$ | $\sigma_t, \text{МПа}$ | $\sigma_B, \text{МПа}$ | $\varepsilon, \%$ |
|--------------------------|-----------------------|----------|-----------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| СВМПЭ                    | 0,928                 | 55,6±0,2 | 405±36          | 22,1±0,9               | 36±1,7                 | 482±24            |
| 5% флуоралита            | 0,954                 | 54,2±0,3 | 352,3±21,7      | 20,4±0,5               | 32,1±0,8               | 434,6±7,8         |
| 5% флуоралита<br>+5% УВ  | 0,987                 | 57,2±0,7 | 486,9±11        | 17±5,4                 | 33,2±9,6               | 431,2±41          |
| 5% флуоралита<br>+10% УВ | 1,008                 | 58,9±1,1 | 616±10          | 24,4±0,5               | 29,7±3,4               | 376±60            |
| 5% флуоралита<br>+20 %УВ | 1,058                 | 61,6±0,8 | 765±30          | 28,9±1,0               | 29,4±1,7               | 297,6±31          |

Исследования структуры всех указанных выше композитов показали, что при содержании наполнителей до 5 вес.% флуоралита и до 10 вес.% углеволокна в композитах сохраняется сферолитная надмолекулярная структура, формирующаяся в исходном высокомолекулярном полимере СВМПЭ.

Проведены триботехнические испытания всех указанных выше композитов на изнашивание при различных нагрузках и скоростях скольжения (60 и 140 Н; 0,3 и 0,5 м/с). Показано, что введение двух наполнителей (твердосмазочного и армирующего) в сверхвысокомолекулярную матрицу позволяет одновременно обеспечить повышение механических характеристик (модуль упругости, предел текучести, твердость) и износостойкости трехкомпонентных композитов на основе СВМПЭ в различных условиях эксплуатации.

При умеренных скорости и нагрузке ( $P=60 \text{ Н}$ ,  $V=0,3 \text{ м/с}$ ) оптимальным составом композита следует считать: «СВМПЭ+5 вес.% флуоралита+5 вес. % УВ» (износостойкость при этом повышается вдвое). В жестких условиях испытаний ( $P=140 \text{ Н} \times V=0,5 \text{ м/с}$ ) двукратное увеличение износостойкости обеспечивает композит «СВМПЭ+5 вес. % флуоралита+10 вес. % УВ».

Обсуждаются механизмы изнашивания трехкомпонентных композитов на основе СВМПЭ.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" Министерства образования и науки РФ; Соглашение № 14.604.21.0154, идентификатор проекта RFMEFI60417X0154.

#### Список литературы

1. Zoo V.S., An J.-W., Lim D.-Ph., Lim D.-S. Effect of carbon nanotube addition on tribological behavior of UHMWPE // Tribology Letters. – 2004. – Vol. 16, N 4. – P. 305-309.
2. Z. Wei, Ya-Pu Zhao, S.L. Ruan, P. Gao. A study of the tribological behavior of carbon-nanotube-reinforced ultrahigh molecular weight polyethylene composites// SURFACE AND INTERFACE ANALYSIS.-2006, Vol. 38, 883-886.
3. S.V. Panin, L.A. Kornienko, V.O. Alexenko et. al. Comparison on efficiency of carbon nano- and microfibers in formation physical-mechanical and tribotechnical properties of polymer composites based on highmolecular weight matrix //Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2016, V. 59, N. 9, P.99-105 (in Russian).