



УДК 621.763:66.086.2/3

© В. А. Иванов, С. П. Захарычев, А. Т. Тарасенко, 2005

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Иванов В. А. – завкафедрой «Машины и оборудование лесного комплекса» д-р техн. наук, проф.; *Захарычев С. П.* – канд. техн. наук, доц. кафедры «Химические технологии и биотехнологии»; *Тарасенко А. Т.* – канд. техн. наук, ст. преп. кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса» (ТОГУ)

Использование новых материалов в узлах трения – одно из направлений повышения надежности машин. Эти материалы должны обладать требуемыми высокими физико-механическими и специальными триботехническими свойствами. Полимерные композиционные материалы (ПКМ), имеющие специфическое свойство самосмазываемости, получили название материалов антифрикционных самосмазывающихся (МАС). Материалы из эпоксиэфторопластовых композиций показали перспективность их применения в узлах трения различных машин. Проведены исследования структур материалов с использованием современных способов микроскопии, позволяющие прогнозировать свойства материалов и оптимизировать технологические процессы.

The use of new materials in the friction units is one of the lines to increase vehicle reliability. These materials must possess the necessary high physicomachanical and special tribotechnical properties. The epoxy-fluorocarbon polymer having specific selflubrication property, have been called antifriction self-greased materials. The materials from epoxy-fluorine compositions considerable promise. The study of material's structure has been conducted with the use of modern microscopy, which allows one to predict properties of materials and optimize technological processes.

Выполняемые на протяжении последних лет в Тихоокеанском государственном университете исследования доказали перспективность применения эпоксиэфторопластовых материалов для широкого спектра триботехнических изделий. Разработанные материалы технологичны, обладают высокой работоспособностью, низким коэффициентом трения и требуемым уровнем износостойкости при эксплуатации в



различных средах с высокими нагрузками в узлах трения самых различных машин. Для организации серийного производства самосмазывающихся подшипников скольжения (СПС) и деталей уплотнительных систем (УПС) узлов гидропривода машин были определены не только оптимальные составы ПКМ, изучены их свойства, но и разработано специальное оборудование и созданы требуемые технологии производства [1-4].

Базовые ПКМ изготавливаются на основе матриц из эпоксидной смолы или смеси эпоксидной и фенолформальдегидной и включают комплексы наполнителей – фторопласт-4, твердые смазки, армирующие волокнистые компоненты и дисперсные порошки. Они получили обозначения ЭФЛОНГ, ЭФЛАСТ и ФЭЛОН [1-3]. Эти материалы весьма перспективны для дальнейшего совершенствования с целью повышения их эксплуатационных показателей путем использования модифицированных связующих и выбора современных наполнителей, созданных в последнее время. Кроме модификации составов, специфическая для машиностроителей технология производства эпоксидофторопластовых антифрикционных материалов и изделий требует разработки и совершенствования специального оборудования, исследования новых технологических способов, определения параметров изготовления триботехнических изделий, исследования свойств новых износостойких ПКМ и изделий из них в различных условиях эксплуатации [5].

Ранее выполненные исследования [1-3] в большей степени были посвящены разработке составов и исследованию свойств базовых эпоксидофторопластовых материалов и меньше уделялось внимание специальным вопросам исследования структур, оптимизации параметров технологии и специального оборудования. С появлением новых методов микроскопии и соответствующей аппаратуры стало возможным углубленно изучить центральное звено известной материаловедческой формулы «состав – структура – свойства». С использованием оптической поляризационной и электронной сканирующей микроскопии изучены микроструктура и топография поверхностей наполнителей ПКМ.

В последнее время лабораторией «Композиционные материалы» разработаны новые составы ПКМ, содержащие в качестве матрицы эпоксидные смолы (связующее) или смесь эпоксидных и фенолформальдегидных смол, а в качестве антифрикционных наполнителей – мелкодисперсный фторопласт Ф-4НТД, графит, дисульфид молибдена, металлические порошки, стекловолокно и углеграфитовые волокна, изучены структуры и исследованы материалы [5].

«Идеальное» связующее для антифрикционных материалов должно обладать высокими показателями прочности (при сжатии и сдвиге) и модуля упругости при сравнительно небольшом удлинении, а также



высокой теплостойкостью. К таким перспективным материалам можно отнести эпоксидно-резорциновые и эпоксидно-аминные смолы (реактопласты), модифицированные изоцианитами ($\sigma_p = 125...130$ МПа, $E = 5,0...5,5 \cdot 10^3$ МПа, $\epsilon_p = 3,0...7,5$ %). Для материалов антифрикционных самосмазывающихся (МАС) преимущественно используется эпоксидная смола ЭД-20 (ГОСТ 10587-76), отверждаемая алифатическим полиэтиленполиамином – ПЭПА (ТУ 6-02-594-75). Для уменьшения вязкости, а также устранения хрупкости в отвержденном состоянии рекомендуется применять пассивные и активные разбавители (например, низковязкие эпоксиалифатические смолы ДЭГ-1, ТЭГ-1 и др.). В качестве пассивного разбавителя, не вступающего в химическое взаимодействие с эпоксидной смолой и способствующего уменьшению межмолекулярного взаимодействия, применяется дибутилфталат.

Антифрикционные наполнители в композиционных материалах выполняют функции уменьшения трения, обеспечения самосмазываемости, задиростойкости и износостойчивости за счет создания на контактирующих поверхностях прочной защитной смазочной пленки. Разработанные материалы отличаются хорошими характеристиками самосмазывания за счет включения в их состав фторопласта-4 (политетрафторэтилена), являющегося термопластом, твердых слоистых смазок, жидких масел, порошков металлов и других наполнителей.

Ф-4 (ГОСТ 10007-80) марки 0 представляет собой легко комкающийся порошок белого цвета с дисперсностью 0,05...0,1 мм. Насыпная плотность материала $\rho = 0,45$ г/см³. По ТУ 6-05-1999-85 выпускаются марки фторопласта Ф-4А1 и Ф-4А2, представляющие собой гранулированные сорта с повышенной сыпучестью и большей насыпной плотностью ($\rho = 0,7$ г/см³), с размером гранул 0,5...0,7 мм. Также выпускаются тонкоизмельченный фторопласт марки Ф-4Т (ТУ 6-05-1999-85), отличающийся малым размером частиц – 0,025...0,04 мм. С 1986 г. Ленинградским объединением «Пластполимер» выпускается фторопласт Ф-4НТД (ТУ 6-05-041-553-78), разработанный для применения в качестве сухой смазки в узлах трения (выпускался в аэрозольных упаковках под названием «Смазка 5,1 сухая фторлан»). Материал Ф-4НТД обладает наибольшей дисперсностью с размерами частиц шаровидной формы – 2...10 мкм. Насыпная плотность $\rho = 0,5-1$ г/см³ (рис. 1, 2).

Графит марки ГС-1 или ГС-2 (ГОСТ 8295-73) вводится в составы для улучшения антифрикционных свойств, увеличения прочности, теплостойкости и теплопроводности, а также – улучшения литейных качеств ПКМ. Графит используется в ПКМ, работающих в узлах без смазки, на открытом воздухе, в водных средах, при повышенных температурах (рис. 3).



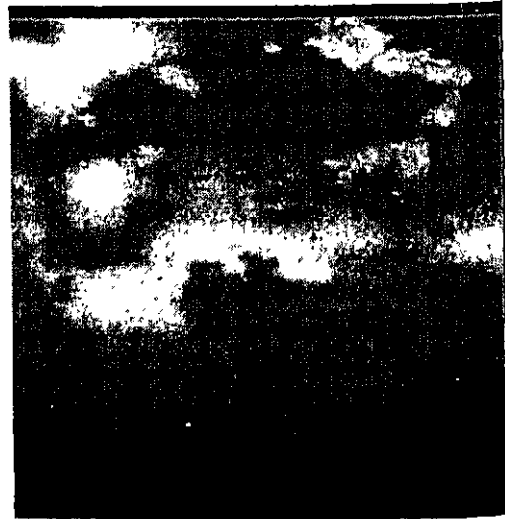
a



б

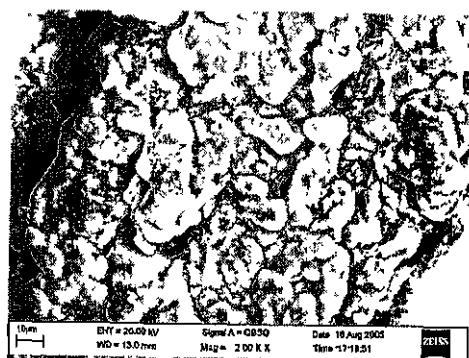


в

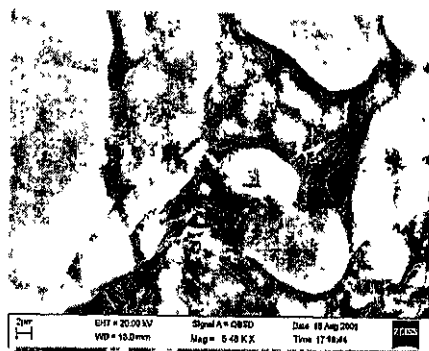


г

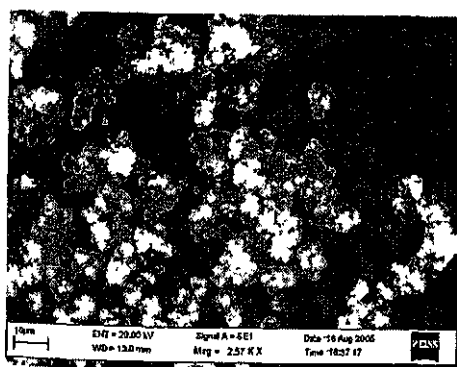
Рис. 1. Макроструктура частиц порошка Ф-4 (*a, б*)
и Ф-4 НТД (*в, г*). Фото в поляризованном свете при $\times 400$ крат.
Фото – поляризационный микроскоп «Микро 2000»



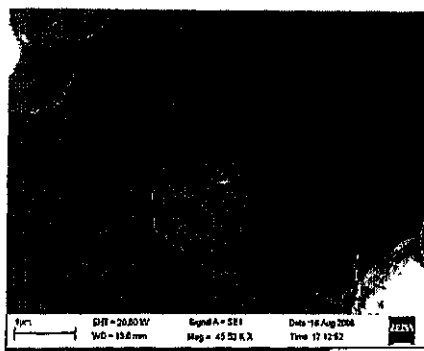
a



б

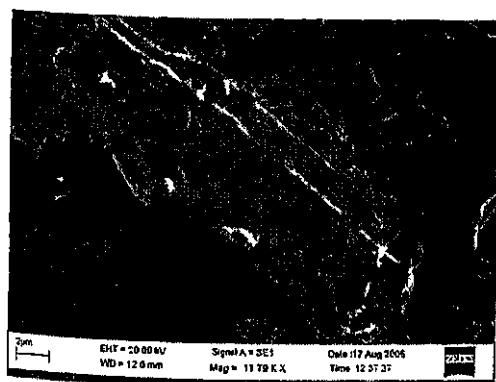


в

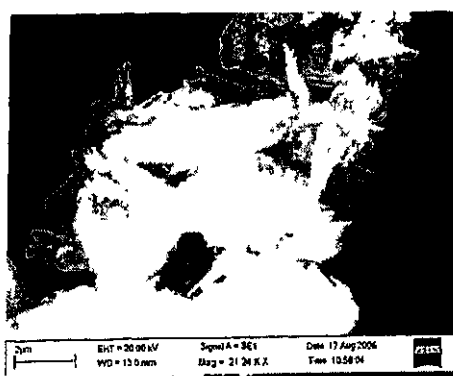


г

Рис. 2. Микроструктуры и топография фторопластов:
a, б – Ф-4 (x2000, x5460 крат.); *в, г* – Ф-4 НТД (x2570, x45530 крат.).
Фото – электронный сканирующий микроскоп Carl Zeiss (Leo)Evo40HV



a



б

Рис. 3. Топография частиц графита (*a*)
и дисульфида молибдена (*б*) (x11790, x21240 крат.).
Фото – электронный сканирующий микроскоп Carl Zeiss (Leo) Evo 40HV

Стекловолокно используется для повышения характеристик прочности ПКМ и износостойкости при жестких режимах трения за счет передачи части нагрузки от матрицы к волокнам.

Для получения МАС на практике используются стеклянные волокна малого диаметра 5...11 мкм. Характеристики стекловолокон: $\rho = 2,54...2,58 \text{ г/см}^3$, $\sigma_p = 3,57...4,57 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, $E = 74...88 \text{ ГПа}$, $\alpha = 4...5 \cdot 10^6 \text{ К}^{-1}$, $\lambda = 6 \cdot 10^8 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ (рис. 4).

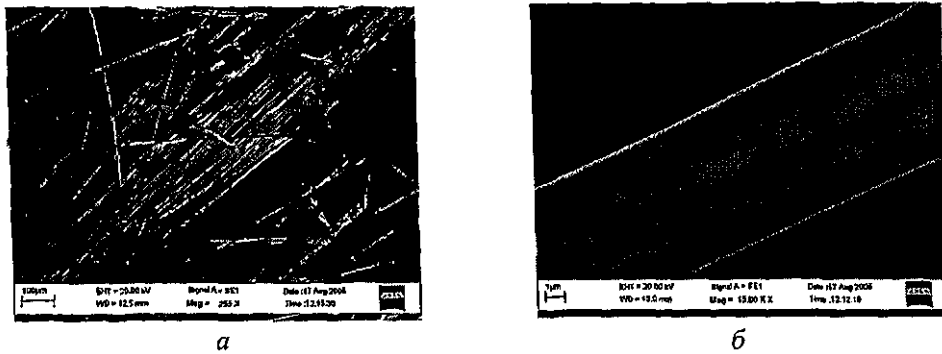


Рис. 4. Микроструктура и топография поверхности стекловолокон (x15000, x255 крат.). Фото – электронный сканирующий микроскоп Carl Zeiss (Leo) Evo 40NV

Углеродные волокнистые материалы или углеволокна получают специальной термообработкой химических или природных волокон, лигнина, каменноугольной смолы и нефтяных пеков. Углеволокна имеют химический состав и структуру, близкую к структуре графита. Классификация углеволокон проводится по содержанию углерода (1 – до 90%; 2 – 90-98%; 3 – свыше 98%), по прочностным показателям (низкопрочные, средней прочности, низко модульные, высокой прочности и высоко модульные) и по конечной температуре термообработки: частично карбонизированные – 573-823 К, углеродистые – 1073-2273 К, графитированные – 2273-3273 К (табл. 1).

Таблица 1

Свойства углеродных волокон

Показатель	Волокно			
	Частично карбонизированное	Углеродистое	Графитированное	Высокомодульное
Плотность, г/см ³	1,50	1,70	1,33–2,00	1,71
Диаметр, мкм	11	8	8	6–10
Прочность при разрыве, МПа	265	520-1180	280 – 930	1400-2210
Модуль упругости, ГПа	3,9	27–47,1	30 – 42,2	250-343
Относительное удлинение, %	6,7	2,5	1,0	-



«Углен-9» используется для создания теплостойких композиционных материалов, не являющихся несущими частями конструкций (средняя прочность жгута в микропластике $\sigma_p = 12,9$ кгс/мм²; толщина одиночного волокна 7–12 мкм; истинная удельная плотность 1,6 г/см³; теплопроводность волокна 5–10 ккал/м·ч⁰С; удельная поверхность волокна 60–100 м²/г; масса 1 метра жгута 12±3 г/м). «Грален» относится к классу графитированных волокон с высокой прочностью и низким модулем, используется в длинноволокнистых композитах для узлов трения. «Эвлон» относится к классу угольных волокон с высокой прочностью и высоким модулем, предназначен для создания высокопрочных несущих углепластиковых конструкций.

«УКН-5000» относится к классу графитированных волокон сверхвысокой прочности и сверхбольшим модулем. Используется для создания особоответственных пространственных конструкций из углепластика и применяется в аэрокосмической технике (рис. 5).

Анализ макро- и микроструктуры частиц наполнителей свидетельствует, что частицы, например, фторопласта Ф-4НТД (рис. 1–2) образуют значительно более развитую мелкодисперсную поверхность в теле матрицы, что способствует улучшению антифрикционных свойств ПКМ. Аналогичные обоснованные выводы можно сделать для волокнистых и других наполнителей. Углеродные волокна более предпочтительны для использования в МАС по сравнению со стеклянными — они имеют более высокую износостойкость и гораздо меньший коэффициент трения, высокие физико-механические показатели, характерную микроструктуру и топографию поверхностей (табл. 2, рис. 4–5).

Таблица 2

Физико-механические свойства углеродных волокон

Показатель	Волокно			
	Углен-9	Грален	Эвлон	УКН-5000
Прочность одиночного волокна, не менее, кгс/мм ²	50	80–100	150	350
Модуль Юнга, не менее, кг/мм ²	1 500	5 000	5 000–7 000	30 000
Относительное удлинение, не более, %	1	1	1,5	0,5

Анализ микроструктур и топографии наполнителей с учетом комплекса их конкретных физико-механических показателей и свойств позволяет сделать обоснованные выводы о целесообразности их использования в различных сочетаниях для антифрикционных ПКМ в зависимости от назначения и условий эксплуатации узлов трения машин.

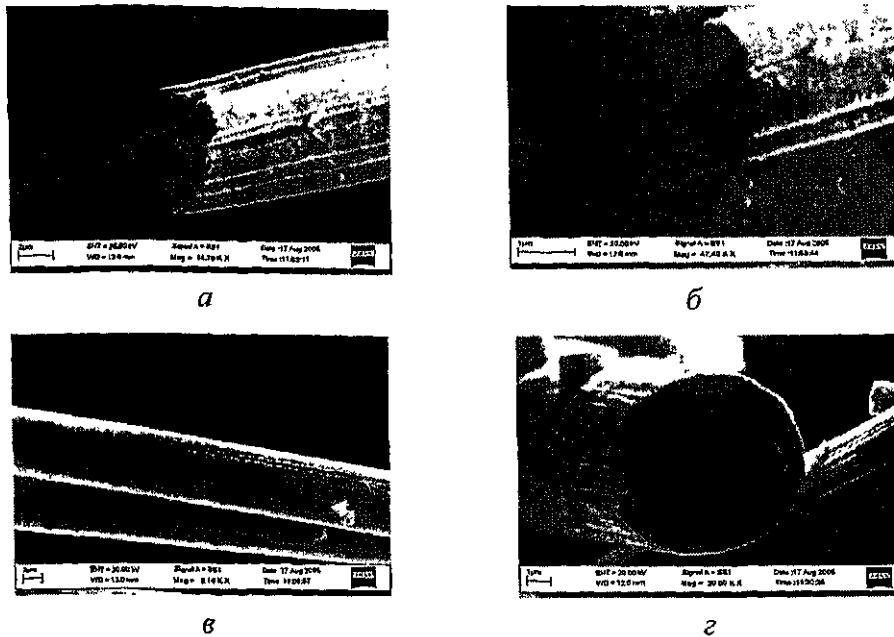


Рис. 5. Микроструктура и топография поверхности углеродных волокон: а, б – Грален; в, з – УКН -5000 (x14790, x47400, x8160, x20000 крат.)

Изучение образующихся внутренних структур ПКМ способствует оптимизации не только составов, но и технологических процессов производства. Микроструктурный анализ модельных образцов компаундов позволил качественно изучить процесс диспергирования наполнителей и использовать его при исследовании смешивания вязких высоконаполненных компаундов [5].

Библиографические ссылки

1. Иванов В. А. Совершенствование материалов и конструкций узлов лесопромышленного оборудования: Обзор. информ. М., 1987.
2. Иванов В. А., Хосен Ри. Прогрессивное самосмазывающиеся материалы на основе эпоксиэфторопластов для триботехнических систем. Владивосток, Хабаровск, 2000.
3. Иванов В. А., Захарычев С. П. Самосмазывающиеся подшипники скольжения и технология их производства. М., 2004.
4. Пат. 2080337 РФ, МКИ⁷ С 08 J Антифрикционная композиция / В. А. Иванов, Г. А. Филиппова (РФ).
5. Тарасенко А. Т. Разработка, исследование и применение эпоксиэфторопластов и специального оборудования для изготовления самосмазывающихся подшипников скольжения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2005.