

the Department "AKMiT", ORCID 0000-0002-5104-7568, Scopus Author ID 57035238500, Researcher ID B-5667-2015 (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: kms142@mail.ru).

Щербakov Виталий Сергеевич (г. Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «СибАДИ», заведующий кафедрой «АППиЭ», ORCID 0000-0002-3084-2271, Scopus Author ID 57034922100, Researcher ID N-1716-2017 (644080, г. Омск, пр. Мира д. 5, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org).

Shcherbakov Vitaliy Sergeevich (Omsk, Rus-

sia) – Doctor of Technical Sciences, Prof., FGBOU VO "SIBADI", Head. Dep. "APPiE", ORCID 0000-0002-3084-2271, Scopus Author ID 57034922100, Researcher ID N-1716-2017 (644080, Omsk, Mira Ave., 5, e-mail: sherbakov_vs@sibadi.org).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Корытов М.С. Исследование состояния вопроса, вывод уравнений математической модели, разработка программного продукта для проверки работоспособности математической модели.

Щербakov В.С. Редактирование текста статьи, заключение.

УДК 620.22
620.178.16

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ НАНОКОМПОЗИТОВ

Ю.К. Машков¹, О.А. Кургузова², А.С. Рубан³

¹ФГБОУ ВО «ОмГТУ», г. Омск, Россия;

²Омский автобронетанковый инженерный институт, г. Омск, Россия;

³ФГБОУ ВО «СибАДИ», г. Омск, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие современной техники выдвигает новые и более высокие требования к физико-механическим свойствам полимерных композиционных материалов, широко применяемых в узлах трения (подшипников, герметизирующих устройств и т.п.) машин общего, специального назначения: транспортных, дорожно-строительных, горных. Это обуславливает актуальность задачи создания новых полимерных нанокomпозитов триботехнического назначения с высокими физико-механическими и триботехническими свойствами. Названная задача решается методами структурной модификации полимерной матрицы ПКМ, а также оптимизацией технологического процесса синтеза композиционных материалов.

Методы и материалы. Одним из перспективных методов структурной модификации является введение в полимерную матрицу наполнителей различного типа, особенно дисперсных и волокнистых, а в последние годы – ультрадисперсных и наноразмерных. Композиционным материалам с нанодисперсными наполнителями присущи свойства, существенно отличающиеся от свойств материала с микро- и макродисперсными частицами, вследствие высокой поверхностной активности наноразмерных частиц наполнителей.

Результаты. В данной работе рассматриваются результаты разработки и исследования полимерных нанокomпозитов с полидисперсными и наноразмерными наполнителями, их влияние на структуру и износостойкость полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена.

Обсуждение и заключение. Эффективность использования полимерных композиционных материалов в узлах трения машин существенно повышается при совершенствовании конструкции узлов с учетом особенностей физико-механических свойств и технологических возможностей полимеров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полимерные композиционные материалы; политетрафторэтилен; нанотрубки; структурная модификация; ограничение теплового расширения; износостойкость.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований по созданию новых полимерных композиционных материалов (ПКМ) антифрикционного назначения на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) обусловлена разнообразием эксплуатационных требований, предъявляемых к материалам, и уникальностью свойств полимерной матрицы. Полимерные композиционные материалы играют прогрессивную роль в развитии прибор- и машиностроения, которая заключается не только в возможности замены различных металлов и сплавов, но и в повышении надежности и долговечности деталей машин и особенно узлов трения. Узлы трения и другие элементы конструкций машин, изготовленные с использованием полимерных материалов, имеют меньшую массу, работают практически бесшумно, обладают демпфирующей способностью, в ряде случаев не требуют смазки. Детали из полимерных материалов работают в вакууме, в химически активной и инертной средах, при криогенных и повышенных температурах в различных узлах трения в широком интервале нагрузок и скоростей скольжения [13]. Задача формирования комплекса эксплуатационных характеристик ПКМ методом структурной модификации матрицы решается путем оптимизации состава и концентрации наполнителей, а также технологического процесса синтеза композиционных материалов. Известно, что эффективными наполнителями для ПТФЭ являются углеродные наполнители, в том числе графит, сажа, углеродные волокна и наноразмерные структуры [1, 2, 3, 4, 5, 6, 23]. Все более привлекательными среди перечисленных наполнителей для использования при создании новых антифрикционных композитов становятся наноразмерные модификаторы, в том числе углеродные нанотрубки. Структурная модификация ПТФЭ и других полимеров введением наноразмерных модификаторов способствует развитию структурообразующих процессов в матрице, изменению свойств и повышению эксплуатационных характеристик материала, в частности износостойкости [4, 5, 6, 7, 23].

Для комплексного улучшения свойств ПКМ в полимерную матрицу одновременно вводят несколько наполнителей, которые, выполняя различные функции, приводят к изменению как надмолекулярной структуры, так и свойств композита [1, 20].

Изменение морфологии надмолекулярной структуры и свойств полимера при введении структурно активных наполнителей зависит

от природы наполнителя, формы и дисперсности частиц. Установлено, что углеродные наполнители обладают высокой структурной активностью, их введение способствует значительному изменению структуры матрицы, сопровождающемуся улучшением комплекса физико-механических и триботехнических свойств ПКМ [1, 20].

Изменение свойств наполненных полимеров связано с особенностями их структурной организации на молекулярном и надмолекулярном уровнях, выражающееся в изменении фазового состояния, молекулярной подвижности сегментов и цепей макромолекул, параметров и типа надмолекулярной структуры. В последние десятилетия накоплен значительный экспериментальный материал, отражающий влияние вида и параметров надмолекулярной структуры на физико-механические и триботехнические свойства многокомпонентных ПТФЭ-композитов, содержащих волокнистые и дисперсные наполнители-модификаторы [8, 9, 10].

Структурные изменения в ПТФЭ при его модификации дисперсным наполнителем описываются в ряде работ [8, 10], однако единого подхода, объясняющего влияние наполнителя на структуру и свойства ПКМ, пока не существует. В работе [10] рассматривается изменение структур ПТФЭ при его модификации ультрадисперсными наполнителями. Полученные результаты подтверждают характерную для частично-кристаллических полимеров закономерность: при малой концентрации наполнителя его частицы играют роль искусственных зародышей, при этом проявляется эффект армирования, способствующий максимальному структурированию полимера вследствие способности наночастиц создавать ансамбли по типу кластеров [11, 14].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что ультрадисперсный наполнитель оказывает на полимерную матрицу многостороннее и сложное влияние. Структурная модификация полимера введением структурно-активных ультрадисперсных наполнителей вызывает значительное изменение его свойств. Работ, посвященных изучению влияния таких наполнителей на физико-механические свойства ПКМ достаточно много. Например, показано, что модификация ПТФЭ разными наполнителями может приводить к повышению жесткости и теплопроводности в 2 – 3 раза; износостойкости до 700 раз; твердости на 10 – 15%; термическое расширение может уменьшаться в 2 – 2,5 раза [12, 13, 14]. Вместе с тем вве-

дение в ПТФЭ наполнителей разной природы может приводить к снижению предела прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве [14, 15].

Структура ПКМ и ее изменения на всех уровнях молекулярной и надмолекулярной организации также влияют на триботехнические свойства ПКМ и в условиях трения определяют механизм фрикционного взаимодействия полимеров и композитов на их основе [4, 8, 14]. Следовательно, изменяя надмолекулярную структуру полимера, особенно в его поверхностных слоях, можно направленно регулировать триботехнические свойства композита [13]. Так, при введении волокнистых и дисперсных наполнителей в ПКМ на основе ПТФЭ увеличивается (в 1,5 – 2 раза) коэффициент трения, но значительно снижается скорость изнашивания (до 600 – 800 раз [13, 14, 16]). Установлено, что это связано с образованием в полимерной матрице сферолитов различных форм и размеров, разрушение которых требует больших энергетических затрат, чем разрушение структурных образований ненаполненного ПТФЭ. Наполнители, имеющие слоистую структуру (MoS_2 , графит) или приобретающие ее в процессе трения (углеродное волокно), не препятствуют образованию на поверхности трения структуры типа жидкокристаллической и могут ограничивать подвижность слоев полимера, что способствует существенному увеличению износостойкости ПКМ на основе ПТФЭ [9, 13, 14].

Большая исследовательская работа по изучению механизма фрикционного взаимодействия и изнашивания ПКМ на основе ПТФЭ проведена коллективом авторов под руководством Ю.К. Машкова [8, 13, 14]. На основе обобщения результатов комплексных исследований и данных литературных источников авторами была предложена физическая и термодинамическая модели процессов трения и изнашивания ПКМ на основе ПТФЭ.

Проблема прогнозирования триботехнических свойств полимерных композиционных материалов приобретает все большую актуальность. Чаще всего задача выбора как вида, так и количественного содержания наполнителей решается чисто экспериментально. Существенно облегчает решение такой задачи исследование двойных систем, в которых в качестве непрерывной основы является полимер, а наполнитель – модификатор представлен дисперсными частицами [9, 14, 15, 20, 23]. Большой вклад в решение названной проблемы и создание композиционных материалов

на основе политетрафторэтилена сделали коллективы под руководством А.А. Охлопковой, А.К. Погосяна, А.И. Свириденко, Ю.К. Машкова и др.

Как сказано выше, формирование комплекса характеристик эксплуатационных свойств ПКМ решается путем оптимизации технологического процесса синтеза композиционных материалов.

Для получения изделий из ПКМ на основе ПТФЭ обычно используются стандартные технологии. Однако в некоторых случаях с целью повышения характеристик физико-механических свойств спекание и охлаждение заготовок производят в специальных приспособлениях при ограничении теплового расширения в направлении усилия прессования [12, 14]. Кроме названных способов термообработки для изготовления ПКМ используется термообработка заготовок в замкнутом объеме – горячее прессование, которое предполагает спекание заготовок в замкнутом объеме [14, 17]. Технологические режимы изготовления композиционного материала по данной технологии требуют больших затрат на изготовление технологической оснастки и трудно реализуемы в производстве в силу критических по технике безопасности условий, низкой (по сравнению со свободным спеканием) производительностью и высокой трудоемкостью [14].

При синтезе ПКМ таким способом возможна реализация процессов формирования надмолекулярной структуры в условиях значительного сближения частиц наполнителя и ПТФЭ не только при прессовании композиции, но и при ее термообработке. При такой технологии, когда формирование структуры происходит под давлением всестороннего сжатия, реализуются благоприятные условия твердофазного синтеза более прочного и износостойкого композиционного материала [14, 15, 19, 20].

Для повышения эффективности структурной модификации ПКМ на основе ПТФЭ предлагается изготовление заготовки в закрытой форме [17], что обеспечивает натяг и возникновение в заготовке внутренних напряжений сжатия за счет ее теплового расширения в процессе термообработки. Ограничение теплового расширения по всей поверхности заготовки может приводить к растрескиванию заготовки за счет возникновения чрезмерно высоких внутренних напряжений [14].

Также известен способ и устройство для спекания ПКМ, которые предусматривают наличие зазора в оправке для спекания [14]. Это позволяет избежать растрескивания заготовок

и получить стабильные и высокие характеристики физико-механических свойств. Недостатком этого метода является необходимость экспериментального определения величины зазоров.

В работе [18] предлагается применять воздействие энергии ультразвуковых колебаний на заготовку из ПКМ в процессе прессования, что является одним из вариантов способа вибрационного воздействия. Полученные результаты свидетельствуют об изменении ряда характеристик физико-механических свойств: увеличении предела прочности при растяжении и модуля Юнга на 10 – 15%; снижении скорости изнашивания до 23,6% и коэффициента трения на 11%.

На основании проведенного анализа был сделан вывод о том, что в качестве способа повышения эффективности структурной модификации ПТФЭ следует использовать способ холодного прессования и термообработки (спекания) заготовок в закрытой оснастке, ограничивающей объемное тепловое расширение спекаемого материала [15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Требования надежности и долговечности к транспортной, дорожно-строительной, горной технике привели к активным исследованиям в области разработок металлополимерных герметизирующих устройств с уплотнительными элементами из ПКМ [15].

В качестве матрицы при создании ПКМ выбран ПТФЭ, так как уникальные физико-химические и антифрикционные свойства ПТФЭ позволяют считать его лучшим материалом для полимерной основы антифрикционных ПКМ. В качестве компонентов комплексного наполнителя по результатам предварительных исследований выбраны: скрытокристаллический графит (СКГ), дисульфид молибдена (ДМ), многослойные углеродные нанотрубки марки Graphistrength фирмы Arkema (УНТ).

Структурно-активные наполнители-модификаторы подвергали механоактивации совместно с порошком ПТФЭ в течение 1,0 – 3,0 минут в высокоскоростном смесителе лопастного типа. Образцы ПКМ с наполнителями всех трех типов изготавливали по одной технологии методом холодного прессования при давлении 70 – 80 МПа с последующим спеканием в условиях ограничения теплового расширения при температуре $360 \pm 3^\circ \text{C}$ [9, 14, 15]. По сравнению со свободным спеканием контактное давление сжатия между частицами возрастает в 3,5 раза, относительная по-

верхность контакта – до 2,4 раза, а пористость материала уменьшается в 2,6 раза [15, 19]. Указанное изменение параметров напряженно-деформированного состояния обеспечивает значительное усиление адгезионного взаимодействия между компонентами (частицами полимера и наполнителя) и за счет этого значительное повышение характеристик механических и триботехнических свойств ПКМ.

Для исследования механических свойств ПКМ использовали стандартные методики [15, 16]. Известно, что для большинства ПКМ значения модулей упругости при растяжении и сжатии близки и, как правило, на несколько десятков процентов больше модуля упругости при изгибе [15]. Поэтому при изучении механических свойств определяли только модуль упругости при растяжении. Исследование механических свойств (предела прочности и модуля упругости при растяжении, относительного удлинения при растяжении) проводили на разрывной машине Zwick Roell в соответствии с ГОСТ 11262 – 80 «Пластмассы. Методы испытания на растяжение» и ГОСТ 25.601 – 80 «Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах».

Исследования проводили при комнатной температуре. Для каждого состава ПКМ изготавливали и испытывали по три образца и определяли среднее значение исследуемого параметра: временное сопротивление при растяжении (σ_b), относительное удлинение при разрыве (δ) и модуль упругости при растяжении (E) [15].

Образцы для испытаний производили из заготовок в виде колец прямоугольного сечения методом механической обработки – точение с последующей штамповкой в специальном вырубном штампе. Скорость деформации при растяжении образцов составляет 50 мм/мин. Методика обеспечивает получение данных с погрешностью не более 5%.

Образец в захватах испытательной машины устанавливается так, чтобы их продольные оси совпали с прямой, соединяющей точки крепления захватов в испытательной машине. Для определения предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве образец равномерно нагружали с заданной скоростью вплоть до его разрушения [15].

Для определения модуля упругости образец равномерно с заданной скоростью нагружали в пределах начального линейного участ-

ка диаграммы деформирования и записывали изменение продольной деформации образца в зависимости от нагрузки. Модуль упругости E определяли как отношение напряжения σ к соответствующей относительной деформации. Образец подвергали при заданной скорости трехкратному нагружению-разгрузке до требуемого уровня ($15 - 40\% F_{\max}$) и при каждом нагружении считывали показания деформаций при двух нагрузках – начальной, равной $2 - 5\%$ от величины разрушающей нагрузки $F_{\max}$ и максимальной. По результатам измерений деформации для каждого нагружения определяли модуль упругости. За результат принимали среднее арифметическое значение всех измерений [15].

Для определения относительного удлинения при разрушении образец нагружали и записывали изменение продольной деформации в зависимости от нагрузки.

Метод снятия диаграммы деформирования при растяжении основан на измерении деформации рабочей части образца и соответствующих им усилий при нагружении вплоть до разрушения. Для записи диаграммы деформирования использовали автоматические схемы записи «нагрузка – деформация» и обработки результатов в комплекте машины Zwick Roell [15].

Исследование характеристик триботехнических свойств материалов проводили на трибометре, в рабочем узле которого реализуется торцовая схема трения «палец (исследуемый материал) – диск» по металлическому контртелу из закаленной стали 45, с твердостью

48 – 52 HRC, шероховатостью поверхности $Ra \leq 0,32$ мкм. Методика [9, 15] предусматривала проведение серии испытаний при постоянной скорости скольжения по средней линии дорожки трения 1,20 м/с, температуре окружающей среды $(293 \pm 5)K$ и контактом давлении 2 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для чистого ПТФЭ получена средняя скорость изнашивания $788 \cdot 10^{-4}$ г/ч [20]. Результаты исследования концентрационной зависимости скорости изнашивания образцов ПКМ с СКГ приведены на рисунке 1 [15].

Из приведенного графика видно, что концентрационная зависимость скорости изнашивания образцов с ультрадисперсным СКГ имеет три характерных участка (см. рисунок 1). При концентрации СКГ 2 – 8 массового содержания в процентах (масс. %) (первый участок) наблюдается значительное снижение скорости изнашивания. На втором участке в интервале концентрации 8 – 20 масс. % получена минимальная и постоянная скорость изнашивания равная $11,2 \cdot 10^{-4}$ г/ч, что в 70 раз меньше по сравнению с чистым ПТФЭ. При повышении концентрации выше 20 масс. % (третий участок) скорость изнашивания постепенно возрастает и становится больше минимальной примерно в 2 раза [15, 20, 21, 22, 23].

С целью определения влияния УНТ на скорость изнашивания были изготовлены и испытаны образцы ПКМ, содержащие одинаковое количество СКГ – 8% масс. и дополнительно

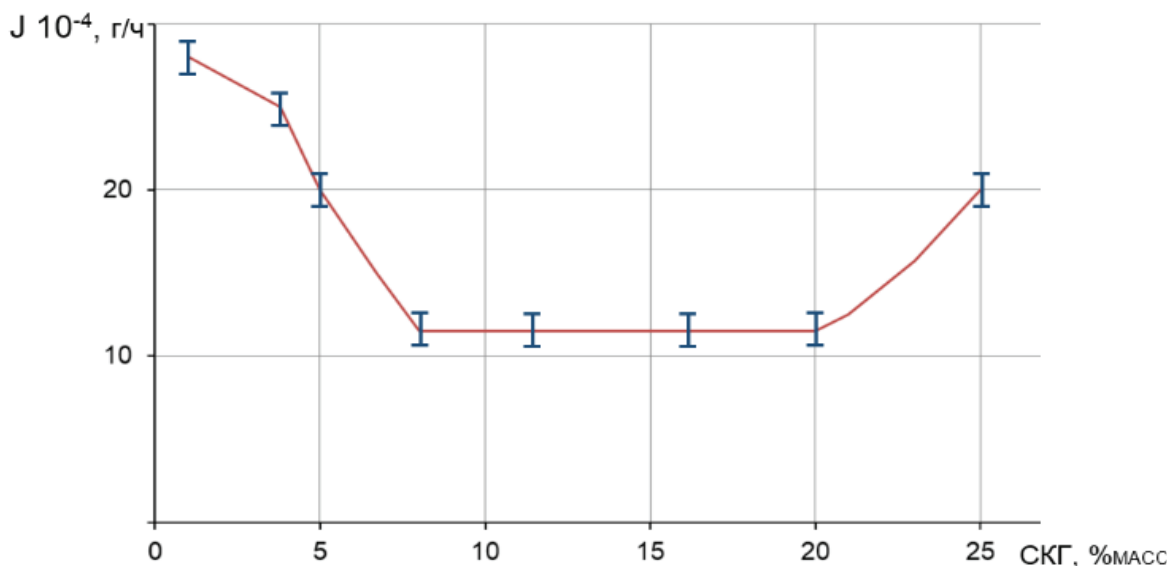


Рисунок 1 – Концентрационная зависимость скорости изнашивания ПКМ с ультрадисперсным СКГ
Figure 1 – Concentration dependence of wear rate of PKM with SCG ultradisperse

от 0,5 до 3,5% масс. углеродных нанотрубок марки Graphistrength® фирмы Arkema (УНТ). Результаты испытаний показаны на рисунке 2 в виде концентрационной зависимости [15].

С увеличением концентрации наномодификатора от 0,5 до 2,0 масс. % скорость изнашивания уменьшается почти в 2 раза и имеет значение в 175 раз меньше, чем у чистого ПТФЭ. При увеличении концентрации УНТ до 3,5 масс. % скорость изнашивания возрастает в два раза (по сравнению с минимальным значением скорости изнашивания, полученным при концентрации УНТ 2 масс. %) [15, 20, 23].

Как видно из графика, введение наноразмерного наполнителя УНТ в комплексе с ультрадисперсным СКГ значительно повышает износостойкость ПКМ. Минимальная скорость

изнашивания получена при концентрации УНТ – 2% масс. Она составляет $4,5 \cdot 10^{-4}$ г/ч, что в 2,5 раза меньше скорости изнашивания композиционного материала, содержащего только 8% масс. СКГ (см. рисунок 2). Сравнение зависимостей на рисунках 1 и 2 наглядно показывает, что введение наноразмерного наполнителя в состав комплексного модификатора обеспечивает существенное (более чем в 2 раза) повышение износостойкости антифрикционного ПКМ на основе ПТФЭ [15, 20, 23].

С целью изучения совместного влияния микроразмерного СКГ и углеродных нанотрубок (УНТ) была проведена серия испытаний образцов ПКМ, содержащих один наполнитель УНТ – 2,0 масс. % и комплексный модификатор, содержащий 8,0 масс. % СКГ и УНТ от 1,0 до 3,0 масс. % (см. таблицу 1) [15, 20, 21].

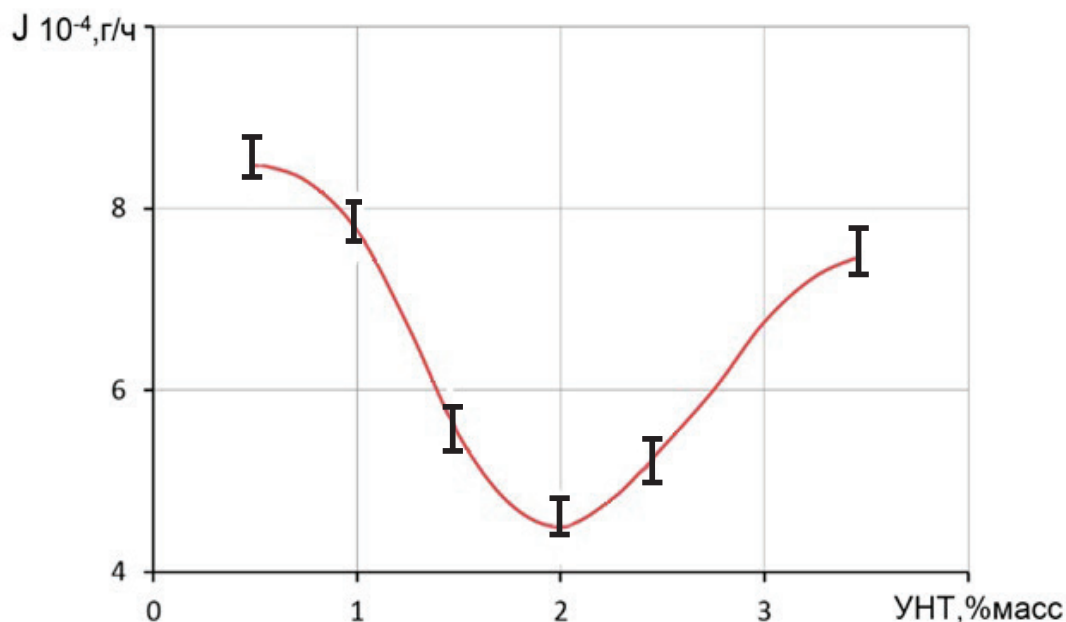


Рисунок 2 – Концентрационная зависимость скорости изнашивания ПКМ с наполнителем: 8% СКГ + УНТ
Figure 2 – Concentration dependence of the wear rate of PKM with 8% CGG + CNT filler:

Таблица 1
СКОРОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ПКМ НА ОСНОВЕ ПТФЭ
Table 1
SPEED OF THE WEAR RATE OF PKM BASED ON PTFE

№ п/п	Концентрация компонентов, масс. %			Скорость изнашивания, 10 ⁻⁴ г/ч
	ПТФЭ	СКГ	УНТ	
1	100	0	0	788
2	97,5	0	2,5	12,5
3	91,0	8,0	1,0	7,8
4	90,5	8,0	1,5	5,7
5	90,0	8,0	2,0	4,5
6	89,0	8,0	3,0	6,9

Как видно из таблицы 1, минимальное значение скорости изнашивания получено для ПКМ состава 90% ПТФЭ + 8% СКГ + 2% УНТ и равно $4,5 \cdot 10^{-4}$ г/ч. Это в 2,5 раза меньше, чем у ПКМ, содержащего 92% ПТФЭ + 8% СКГ. Этот результат свидетельствует о том, что использование наноразмерного наполнителя УНТ более эффективно при использовании в составе комплексного наполнителя [15, 20, 23].

Выше было сказано, что в условиях ограничения теплового расширения, когда объем заготовки с повышением температуры остается практически постоянным, возникает значительное внутреннее сжимающее давление, что приводит к повышению характеристик механических и триботехнических свойств ПКМ [14, 15, 19]. В таблице 2 приведены сравнительные характеристики механических и триботехнических свойств образцов ПКМ, термообработанных свободным спеканием и в условиях объемного ограничения теплового расширения.

Приведенные данные показывают, что при спекании образцов с ограничением теплового расширения предел прочности повышается на 48%, модуль упругости – на 31,9%, относительное удлинение – на 26%. При этом скорость изнашивания уменьшается на 21%, коэффициент трения – на 9%. Следовательно, предлагаемый способ термообработки в закрытом устройстве является весьма эффективным [15, 23].

Исследование механических и триботехнических свойств позволило разработать новый полимерный композиционный материал, предназначенный для эксплуатации в изделиях автомобильной, дорожно-строительной, горной и других видах техники.

ОБСУЖДЕНИЕ

Создание полимерных нанокомпозитов с высокими показателями физико-механических и триботехнических свойств является актуальной задачей, которая может быть успешно решена методами многоуровневой структурой модификации полимерной матрицы путем введения наполнителей различной природы и морфологии: волокнистых, дисперсных и наноразмерных [9, 14, 24]. Развитая поверхность наночастиц обладает избыточной поверхностной энергией и обуславливает значительное изменение и повышение физико-механических свойств нанокомпозитов в сравнении со свойствами макроструктурных материалов [15, 21, 24]. Исследование триботехнических свойств ПТФЭ-композитов с названными углеродными наполнителями-модификаторами показало, что наиболее эффективным является комплексный наполнитель, содержащий полидисперсный порошок скрытокристаллического графита и углеродные нанотрубки, обеспечивающий наиболее высокую износостойкость полимерного композита [15, 20, 23]. Достигнутая эффективность структурной модификации является следствием высокой структурной активности углеродных микро- и наноразмерных наполнителей-модификаторов [19, 20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эффективность использования ПКМ в узлах трения машин существенно повышается при совершенствовании конструкции (подшипников, герметизирующих устройств, поршней и т.д.) узлов с учетом особенностей физико-механических свойств и технологических возможностей полимеров (самосмазывание зоны трения, самоуплотнение узла за счет разности

Таблица 2
ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПКМ,
ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПРИ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ СПЕКАНИЯ

Table 2
CHARACTERISTICS OF MECHANICAL AND TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF PKM,
MANUFACTURED BY TWO DIFFERENT METHODS OF SINKING

Способ спекания (термообработки)	Характеристики свойств (средние значения)				
	Скорость изнашивания J, 10^{-4} г/час	Коэффициент трения, f	Модуль упругости, E, МПа	Предел прочности, σ_b , МПа	Относительное удлинение, δ , %
Свободное спекание	5,7	0,11	187	12,7	135
Спекание с ограничением теплового расширения	4,5	0,10	248	18,9	170

коэффициентов термического расширения полимера и металла и т.д.).

Таким образом, данными испытаниями исследовано влияние комплексного наполнителя, содержащего углеродные нанотрубки, полидисперсный скрытокристаллический графит и дисульфид молибдена, на механические и триботехнические свойства разработанного нанокompозита [15, 20].

Показано, что наиболее эффективным является комплексный наполнитель, содержащий полидисперсный порошок скрытокристаллического графита и углеродные нанотрубки [25], которые обеспечивают наибольшую износостойкость ПКМ.

Предложен и отработан способ повышения эффективности структурной модификации ПТФЭ путем спекания материала в условиях объемного ограничения теплового расширения, приводящий к усилению контактного взаимодействия и адгезионных связей полимерной матрицы с наполнителем, что обеспечивает значительное повышение характеристик механических и триботехнических свойств [14, 15, 26].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машков Ю.К. [и др.]. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. М. : Машиностроение, 2005. 240 с.
2. Aderikha V. N., Shapovalov V. A. Effect of filler surface properties on structure, mechanical and tribological behavior of PTFE-carbon black composites. *Wear*. 2010. no. 268. pp. 1455 – 1464.
3. Адери́ха В.Н. [и др.]. Прочностные свойства, структура и износостойкость композитов ПТФЭ-технический углерод // *Трение и износ*. 2008. Т. 29. № 2. С. 160 – 168.
4. Shi Y. The effect of surface modification on the friction and wear behavior of carbon nanofiber-filled PTFE composites. / Y. Shi [et al.] // *Wear*, 2008, no. 264, pp. 934 – 939.
5. Vail J. R., Burris D. L., Sawyer W. G. Multifunctionality of single-walled carbon nanotube-polytetrafluoroethylene nanocomposites. *Wear*. 2009. no. 267. pp. 619 – 624.
6. Гинзбург Б. М. [и др.]. Трибологические свойства композитов политетрафторэтилен – фуллереновая сажа // *Высокомолекулярные соединения. Сер. А*. 2008. Т. 50. № 8. С. 1483 – 1492.
7. Ткачев А.Г., Золотухин И.В. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур : монография. М. : Изд-во Машиностроение-1, 2007. 316 с.
8. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И. [и др.] Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. М. : Машиностроение, 2005. 240 с.
9. Машков Ю.К., Кропотин О.В. Трибофизика и структурная модификация материалов трибосистем : монография. Омск, 2009. 324 с.
10. Суриков В.И. Повышение эксплуатационных свойств композитов на основе политетрафторэтилена путем структурной многоуровневой модификации : дис. ... д-ра техн. наук. Омск, 2001. 363 с.
11. Андрианова О.А. Модифицированные полимерные и эластомерные триботехнические материалы для техники Севера : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 337 с.
12. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб. : Профессия, 2006. 624 с.
13. Машков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарацкая М.Ю., Мамаев О.А. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. М : Недра, 2004. 262 с.
14. Егорова В.А. Повышение эффективности структурной модификации политетрафторэтилена скрытокристаллическим графитом путем ограничения теплового расширения при спекании : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2008. 156 с.
15. Кургузова О.А. Разработка износостойкого нанокompозита на основе политетрафторэтилена с целью повышения работоспособности и долговечности металлополимерных герметизирующих устройств : дис. ... канд. техн. наук. Омск, 2014. 107 с.
16. Машков Ю.К., Полещенко К.Н., Поворознюк С.Н., Орлов П.В. Трение и модифицирование материалов трибосистем. М.: Наука, 2000. 280 с.
17. Stan F., Fetecau C. Study of stress relaxation in polytetrafluoroethylene composites by cylindrical macroindentation // *Composites*. 2013, no. 47, Part B, pp. 298 – 307.
18. Машков Ю.К., Негров Д.А., Овчар З.Н., Зябликов В.С. Улучшение механических и триботехнических свойств полимерных композиционных материалов с использованием энергии ультразвуковых колебаний // *Трение и износ*. 2006. Т. 27, № 3. С. 313 – 317.
19. Кропотин О.В. Износостойкость ПТФЭ-композитов для повышения надежности металлополимерных герметизирующих устройств изделий машиностроения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. 34 с.
20. Кропотин О.В., Машков Ю.К., Егорова В.А., Кургузова О.А. Влияние углеродных модификаторов на структуру и износостойкость полимерных нанокompозитов на основе политетрафторэтилена // *Журнал технической физики*, 2014, т.84, вып.5. с. 66-70
21. Машков Ю.К., Кропотин О.В., Шилько В.А., Егорова О.В., Чемисенко О.В. Формирование структуры и свойств антифрикционных композитов модификаций политетрафторэтилена полидисперсными наполнителями // *Материаловедение*. 2015. № 1. С. 22 – 25.
22. Марков А.В., Власов С.В. Принципы выбора полимерных материалов для изготовления изделий. // *Полимерные материалы. Изделия. Оборудование. Технологии*. 2004. № 6 – 8. С. 17 – 29.
23. Машков Ю.К., Кропотин О.В., Кургузова О.А. Создание полимерного антифрикционного нанокompозита на основе политетрафторэтилена с повышенной износостойкостью // *Омский научный вестник*. 2013. № 2 (120). С.86 – 89.
24. Машков Ю.К., Кургузова О.А., Клименко С.В. Исследование полимерного нанокompозита для узлов трения // *Вестник Сибирского отделения Академии военных наук*. № 46, Омск : ОАБИИ, 2017. С.53 – 56.
25. Антифрикционный полимерный композиционный материал // Патент РФ 2525492 С2. № 2012146766/05; заявл. 10.05.2014; опубл. 20.08.2014, Бюл. № 23 / Ю.К. Машков, О.В. Кропотин, О.А. Кургузова. (RU). 3 с.
26. Способ изготовления из полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и устройство для изготовления изделий // Патент на изобретение 2546161 С2. № 2013125074/05; заявл. 10.12.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10 / Ю.К. Машков, О.В. Кропотин, В.А. Егорова, О.А. Кургузова (RU). 3 с.

RESISTANT POLYMER NANOCOMPOSITES' DEVELOPMENT AND INVESTIGATION

Yu.K. Mashkov, O.A. Kurguzova, A.S. Ruban

ABSTRACT

Introduction. The advanced technology development demands higher requirements to the physico-mechanical characteristics of the polymer composite materials (PCM) widely used in general and special purpose products such as in transport and road-building. This determines the relevance and significance of the new polymer nanocomposites development on the tribotechnical purpose with high physic-mechanical and tribotechnical characteristics.

Materials and methods. The problem mentioned above is solved by means of the structural modification's methods of the PCM polymer matrix and the technological process optimization of the composite materials' synthesis. One of the structural modification advanced methods is the polymer matrix charging with different fillers' types, particularly, disperse and fiber ones, and in recent years – ultradispersed and nanodimensional fillers.

Results. The composite materials with nanodispersed fillers feature the properties significantly different from those of the materials with micro- and macrodispersed particles because of the high surface activity of nanodimensional particles' fillers.

Discussion and conclusion. The research deals with the development results and polymer nanocomposites' investigation with polydispersed and nanodimensional fillers, their influence upon the structure and wear-resistance of the polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene.

KEYWORDS: polymeric composite; polytetrafluoroethylene; nanotubes; structure modification; restriction of thermal expansion; wear-resistant.

REFERENCES

1. Mashkov Yu.K. Kompozicionnye materialy na osnove politetrafluoretilena [Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification]. Strukturnaya modifikatsiya. Moscow, Mashinostroenie, 2005. 240 p.
2. Aderikha V. N., Shapovalov V. A. Effect of filler surface properties on structure, mechanical and tribological behavior of PTFE-carbon black composites. Wear. 2010. no. 268. pp. 1455 – 1464.
3. Aderikha V.N. Prochnostnye svoystva, struktura i iznosostoikost' kompozitov PTFE-tehnicheskij uglerod [Strength properties, structure and wear resistance of PTFE-carbon composites]. Trenie i iznos. 2008. Vol. 29, no. 2. pp. 160 – 168.
4. Shi Y. The effect of surface modification on the friction and wear behavior of carbon nanofiber-filled PTFE composites. Wear. 2008. no. 264. pp. 934 – 939.
5. Vail J.R., Burris D.L., Sawyer W.G. Multifunctionality of single-walled carbon nanotube-polytetrafluoroethylene nanocomposites. Wear. 2009. no. 267. pp. 619 – 624.
6. Ginzburg B.M. Tribologicheskie svoystva kompozitov polytetrafluoroethylene – fullerenovaya sazha [Tribological properties of polytetrafluoroethylene fullerene black composite]. Vysokomolekulyarnye soedineniya. Ser. A., 2008. Vol. 50, no. 8, pp. 1483 – 1492.
7. Tkachev A.G., Zolotuhin I.V. Apparatura i metody sinteza tverdotel'nykh nanostruktur [Equipment and methods for the synthesis of solid-state nanostructures: monograph]. Moscow, Mashinostroenie-1, 2007. 316 p.
8. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Surikov V.I. Kompozicionnye materialy na osnove politetrafluoretilena [Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification]. Moscow, Mashinostroenie, 2005. 200 p.
9. Mashkov Yu.K., Kropotin O.V. Tribofizika i strukturnaya modifikatsiya materialov tribosystem [Tribophysics and structural modification of tribosystem materials]. Omsk, 2009. 324

p.

10. Surikov V.I. Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv kompozitov na osnove politetrafluoretilena putem strukturnoy mnogourovnevnoy modifikatsii. Doct. Diss. [Increase of operational properties of composites on the basis of polytetrafluoroethylene by structural multilevel modification. Doct. Diss.]. Omsk, 2001. 363 p.
11. Andrianova O.A. Modificirovannye polimernye i elastomernye tribotekhnicheskie materialy dlya tekhniki Severa. Doct. Diss. [Modified polymeric and elastomeric tribotechnical materials for engineering of the North. Doct. Diss.]. M., 2000. 337 p.
12. Mihajlin Yu.A. Termoustojchivye polimery i polimernye materialy [Thermally stable polymers and polymer materials]. St. Petersburg, Professiya, 2006. 624 p.
13. Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Bajbarackaya M.Yu., Mamaev O.A. Polimernye kompozicionnye materialy v tribotekhnike [Polymer composites in tribotechnics]. Moscow, Nedra, 2004. 262 p.
14. Egorova V.A. Povyshenie effektivnosti strukturnoy modifikatsii politetrafluoretilena skrytokristallicheskim grafitom putem ogranicheniya teplovogo rasshireniya pri spekanii. Doct. Diss. [Increase of efficiency of structural modification of polytetrafluoroethylene by cryptocrystalline graphite by limiting thermal expansion during sintering. Doct. Diss.]. Omsk, 2008. 156 p.
15. Kurguzova O.A. Razrabotka iznosostoikogo nanokompozita na osnove politetrafluoretilena s cel'yu povysheniya rabotosposobnosti i dolgovechnosti metallopolimernykh germetiziruyushchih ustroystv. Doct. Diss. [Development of a wear-resistant nanocomposite based on polytetrafluoroethylene in order to improve the operability and durability of metal-polymer sealing devices. Doct. Diss.]. Omsk, 2014. 107 p.
16. Mashkov Yu.K., Poleshenko K.N., Povoroznyuk S.N., Orlov P.V. Trenie i modificirovannye materialy tribosystem [Friction and modification of tribosystem materials]. Moscow, Nauka, 2000. 337 p.

17. Stan F., Fetecau C. Study of stress relaxation in polytetrafluoroethylene composites by cylindrical macroindentation. *Composites*. 2013, no. 47, Part B, pp. 298 – 307.

18. Mashkov Yu.K., Negrov D.A., Ovchar Z.N., Zyalikov. Uluchshenie mekhanicheskikh i tribotekhnicheskikh svoystv kompozitsionnykh materialov s ispol'zovaniem energii ul'trazvukovykh kolebaniy [Improvement of mechanical and tribotechnical properties of polymeric composite materials using ultrasonic vibration energy]. *Trenie i iznos*. 2006. Vol. 27, no. 3, pp. 313 – 317.

19. Kropotin O.V. Iznosostoikost' PTFE-compositov dlya povysheniya nadezhnosti metallopolimernykh germetiziruyushchikh ustroystv izdelij mashinostroeniya. avtoref. Doct. Diss. [Wear resistance of PTFE composites for increasing the reliability of metal-polymer sealing devices of engineering products. Doct. Diss.]. Omsk, OmgTU. 2016. 34 p.

20. Kropotin O.V., Mashkov Yu.K., Egorova V.A., Kurguzova O.A. Vliyaniye uglerodnkh modifikatorov na strukturu i iznosostoikost' polimernykh nanokompozitov na osnove politetrafluoretilena [Effect of carbon modifiers on the structure and wear resistance of polymeric nanocomposites based on polytetrafluoroethylene]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2014, Vol. 84, no. 5, pp. 66 – 70.

21. Mashkov Yu.K., Kropotin O.V., Shil'ko V.A., Egorova V.A., Chemisenko O.V. Formirovaniye struktury i svoystv antifriktsionnykh kompozitov modifikatsiy politetrafluoretilena polidispersnyimi napolnitelyami [Formation of the structure and properties of antifriction composites of modifications of polytetrafluoroethylene with polydisperse fillers]. *Materialovedenie*. 2015, no. 1, pp. 22 – 25.

22. Markov A.V., Vlasov S.V. Principy vybora polimernykh materialov dlya izgotovleniya izdelij [Principles of choosing polymeric materials for the manufacture of products]. *Polimernyye materialy. izdeliya. Oborudovaniye. Tekhnologii*. 2004, no. 6 – 8, pp. 17 – 29.

23. Mashkov Yu.K., Kropotin O.V., Kurguzova O.A. Sozdaniye polimernogo antifriktsionnogo nanokompozita na osnove politetrafluoretilena s povyshennoy iznosostoikost'yu [Creation of a polymeric antifriction nanocomposite based on polytetrafluoroethylene with increased wear resistance]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2013, no. 2 (120), pp. 86 – 89.

24. Mashkov Yu.K., Kurguzova O.A., Klimenko S.V. Issledovaniye polimernogo nanokompozita dlya uzlov treniya [Investigation of polymer nanocomposite for friction units]. *Vestnik Sibirskogo otdeleniya Akademii voennykh nauk*, 2017, no. 46, pp. 53 – 56.

25. Mashkov Yu.K., Kropotin O.V., Kurguzova O.A. Antifriktsionnyy polimernyy kompozitsionnyy material [Antifriction polymeric composite material]. Patent RF, no. 2012146766/05. 2014. 3 p.

26. Mashkov Yu.K., Kropotin O.V., Egorova V.A., Kurguzova O.A. Sposob izgotovleniya iz polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove politetrafluoretilena i ustroystvo dlya izgotovleniya izdelij [Method of manufacturing from polymeric composite materials based on polytetrafluoroethylene and a device for manufacturing articles]. Patent RF, no. 2013125074/05; 2015. 3 p.

Поступила 15.01.2018, принята к публикации 15.02.2018.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Машков Юрий Константинович (г. Омск, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры физики ФГБОУ ВПО «ОмГТУ», (г. Омск, пр. Мира, д. 11, ФГБОУ ВПО «ОмГТУ», тел. (3812) 65-22-92, e-mail: omgtu_physics@mail.ru).

Mashkov Yuriy Konstantinovich (Omsk, Russia) – Doctor of Technical Science, Professore, Professor of the Department of physics Omsk State Technical University (Omsk, Ave. Mira, 11, tel. (3812) 65-22-92, e-mail: omgtu_physics@mail.ru).

Кургузова Олеся Александровна (г. Омск, Россия) – кандидат технических наук; доцент кафедры технологии производства Омского автобронетанкового инженерного института ОАБИИ (г.Омск, 14 Военный городок, д. 119, e-mail: olesyakurguzova@mail.ru).

Kurguzova Olesya Aleksandrovna (Omsk, Russia) – Candidate of Technical Science, Associate Professor of technology production Department in the Omsk Tank-Automotive Engineering Institute (Omsk, 14 Voennyj gorodok, 119, e-mail: olesyakurguzova@mail.ru).

Рубан Анна Сергеевна (г. Омск, Россия) – кандидат технических наук; доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «СибАДИ» (г. Омск, пр. Мира, д. 5, e-mail: rubananna@mail.ru).

Ruban Anna Sergeevna (Omsk, Russia) – Candidate of Technical Science, Associate Professor of Physics in the Siberian State Automobile and Highway University (Omsk, Ave. Mira, 5, e-mail: rubananna@mail.ru).

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Кургузова О.А. Написание аннотации, обзора во введении, описания результатов исследования концентрационной зависимости скорости изнашивания образцов.

Рубан А.С. Описание методик для исследования механических и триботехнических свойств ПКМ, характеристики механических и триботехнических свойств ПКМ, изготовленных при двух различных способах спекания.

Машков Ю.К. Написание введения, обсуждения, заключения.

=====