

*В. Н. Анисимов, канд. техн. наук, доц.,
И. М. Кузьяев, д-р техн. наук, доц.*

АНАЛИЗ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИХ КОМПОЗИТОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

Украинский государственный химико-технологический университет,
Днепропетровск

Приведен анализ основных трибологических свойств для термопластичных полимерных материалов и их композитов, которые нашли наибольшее применение в узлах подшипников скольжения. Оценено влияние различных составов и наполнителей, в том числе и с использованием наноматериалов, на трибологические свойства полиамидных и полиуретановых композитов. Предложены методики оптимизации коэффициентов трения и износостойкости термопластичных композиционных материалов, используемых в подшипниковых узлах.

Введение. Практически любой машинный агрегат имеет вращающиеся элементы, которые установлены в подшипниковых узлах. При этом все большее применение находят подшипники скольжения, основным преимуществом которых является относительная простота изготовления и высокая степень унификации. Поддержание соответствующей надежности работы подшипникового узла связано, в первую очередь, с правильным выбором материала втулки в соответствии с режимами работы и условиями эксплуатации.

В настоящее время предъявляются очень жесткие требования к материалам для изделий, функционирующих в узлах машин при наличии различного вида трения. К основным таким узлам, в первую очередь, следует отнести подшипники скольжения и уплотнительные системы различных типов. При этом, с целью максимальной оптимизации необходимых характеристик используемого полимерного композита в соответствии с эксплуатационными требованиями к рабочим режимам и геометрическим размерам узлов трения, в полимерную матрицу вводят различного рода модифицирующие добавки и упрочняющие наполнители. Необходимо заме-

тять, что одной и той же полимерной матрице, в зависимости от добавок и наполнителей, которые формируют полимерный композит, можно придавать как антифрикционные, так и фрикционные свойства. В этом случае следует следить за тем, чтобы не снижались прочностные свойства получаемых композитов, поскольку элементы узлов трения работают в условиях повышенных силовых и температурных воздействий.

К наиболее распространенным термопластичным антифрикционным материалам следует отнести полиамиды, как алифатические, так и ароматические, и полиуретаны.

Оптимизация коэффициента трения. При создании полимерных материалов, используемых в подшипниках скольжения, особое значение уделяется коэффициенту трения, который должен иметь как можно меньшее значение, что предопределяет надежность и долговечность его функционирования.

На рис. 1 представлены графики для коэффициентов трения f в зависимости от двух параметров, а именно, температуры T и давления P , полученные обработкой экспериментальных данных, взятых из [1], при помощи математического пакета MathCad.

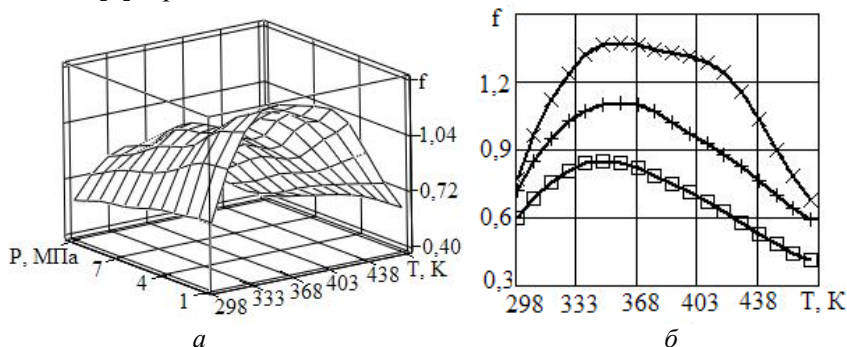


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения f для полиамида ПА-6: a – от температуры T и давления P ; b – от температуры T при фиксированных давлениях P , ($- \times - - - P = 1$ МПа, $- + - - - P = 5$ МПа, $- \square - - - P = 10$ МПа)

Как видно из приведенных на рис. 1 графиков, для полиамида ПА-6 наблюдается наличие явного максимума для коэффициента трения в интервале температур $T = 333\div 368$ К, что следует учитывать при выборе температурных режимов работы подшипнико-

вых узлов с учетом возникновения возможных диссипативных тепловых процессов, которые отрицательно будут влиять на прочностные характеристики рабочих элементов подшипников.

На рис. 2 приведены аналогичные графики для стеклонаполненного ПА-6.

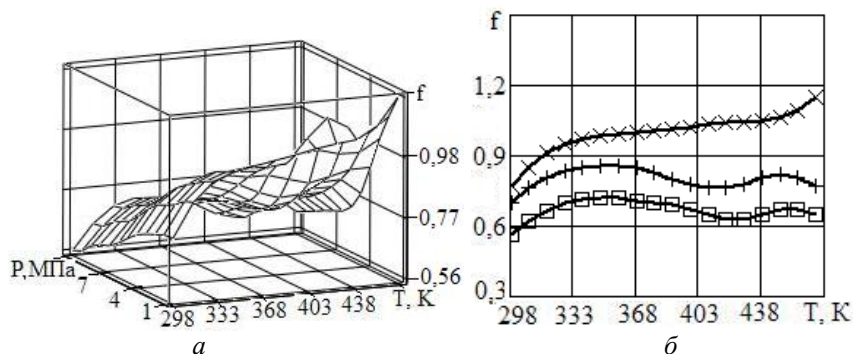


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения f для полиамида ПА-6, наполненного 30 % стекловолокна: a – от температуры T и давления P ; b – от температуры T при фиксированных давлениях P

($-\times---P=1$ МПа, $-\text{+}---P=5$ МПа, $-\square---P=10$ МПа)

Приведенные графики показывают, что наполнение полиамида стекловолокном уменьшает коэффициент трения и, кроме того, повышает физико-механические свойства композитов, увеличивая тем самым эксплуатационные способности подшипниковых узлов.

В работе [2] выполнены исследования, которые оценивают влияние органоглины на уровень коэффициентов трения композитов на базе полиамида ПА-6. Исследования проводились на четырех образцах. Образец 1 выполнен из чистого ПА-6; образец 2 представляет собой композит с добавлением органоглины без воздействия воды; образец 3 также включает органоглину, обработанную органическим алкилом с поверхностно-активным аммонием; образец 4 аналогичен образцу 2, но подготовленный в присутствии воды. Эксперименты проводились при нагрузке 5 Н, результаты которого представлены на рис. 3.

Приведенные на рис. 3 результаты показывают, что при малых скоростях скольжения не наблюдается сколько-нибудь заметного изменения коэффициента трения в зависимости от пути скольжения, причем наименьшее значение коэффициента трения имеет образец 4.

С возрастом скорости скольжения данная тенденция изменяется, что можно объяснить появлением смазывающей пленки.

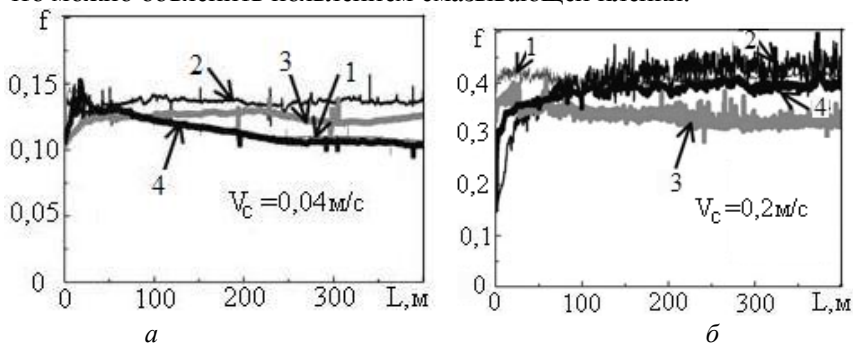


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения f от пути скольжения L композиций на основе ПА-6, наполненного органоглиной: a – при скорости скольжения $V_c = 0,04$ м/с; b – при скорости скольжения $V_c = 0,20$ м/с

Снижение коэффициента трения можно добиться введением в композит других элементов. Так, в работе [3] для этих целей использован SiO_2 , в результате чего коэффициент трения уменьшился в 2 раза.

Среди ароматических полиамидов наибольшее применение нашел фенилон. Характерные кривые коэффициента трения для фенилона С-2 приведены на рис. 4 [1].

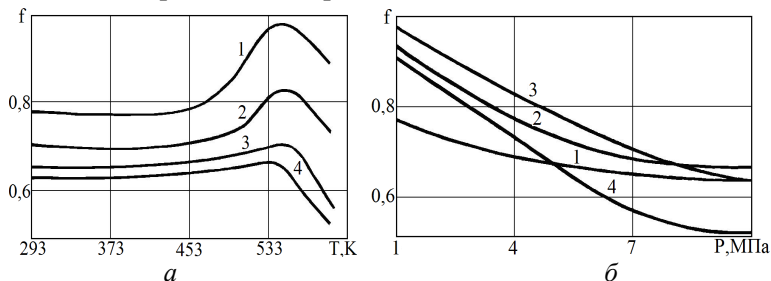


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения f для фенилона С-2: a – от температуры T при разных уровнях давлений P : (1 – 1 МПа; 2 – 4 МПа; 3 – 7 МПа; 4 – 10 МПа); b – от давления P при разных уровнях температуры T : (1 – 293 К; 2 – 513 К; 3 – 553 К; 4 – 593 К)

В работе [4] исследованы трибологические свойства материалов, полученных на основе термопласта фенилон С-2 (ФС-2), модифицированного терморасширенным графитом (ТРГ) и синтезированным эпоксисиликатом кобальта. При этом коэффициент

трения определяли на машине трения СМЦ-2 при скорости скольжения 1 м/с и нагрузке 1 МПа. Экспериментальные данные приведены на рис. 5.

Наименьший коэффициент трения для данных условий ($P \cdot V = 3$ МПа·м/с) по результатам триботехнических характеристик наблюдается в материале при содержании наполнителя 5 мас. %. Необходимо отметить, что данное значение критерия $P \cdot V$ для графитопласта с 5 мас. % ТРГ является предельным, в то время как материалы с наполнителем в количестве 15 и 25 мас. % работают при $P \cdot V < 25$ МПа·м/с.

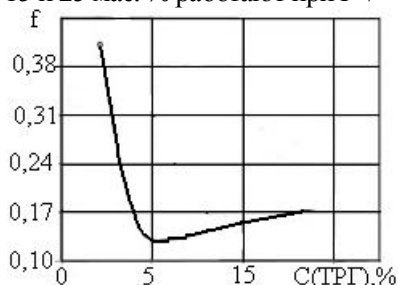


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения f для композита ФС-2/ТРГ от содержания ТРГ

В работе [5] проведены исследования, направленные на оптимизацию коэффициента трения полимерных композитов на базе ароматического полиамида фенилон; в качестве наполнителей (модификаторов) использовался графит и различного типа олигоорганосилоксаны.

На рис. 6 приведены экспериментальные кривые, характеризующие изменение коэффициента трения в зависимости от содержания графита ГК-1 и полиметилсилоксана (ПМС) для композитов на основе фенилона.

Экспериментальные результаты показывают, что при введении в композит графита улучшаются антифрикционные характеристики. В то же время, вследствие ограничения подвижности надмолекулярных структур, увеличивается жесткость и хрупкость материалов, снижая при этом ударную вязкость, что не желательно для элементов подшипниковых узлов. Кремнийорганический модификатор оказывает противоположное воздействие, а именно, способствует повышению пластичности полимерной системы, что можно объяснить снижением энергии межмолекулярного взаимодействия. Таким образом, выбор

оптимального соотношения между компонентами данной системы может значительно снизить коэффициент трения, не ухудшая прочностные характеристики композитного материала.

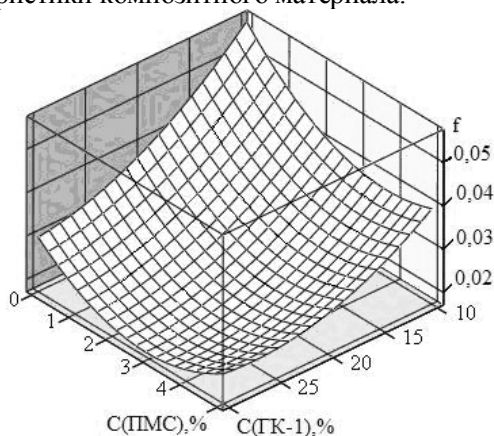


Рис. 6. Зависимости коэффициента трения f от содержания графита ГК-1 и ПМС для композитов на основе ФС-2

Среди других работ, где исследовалась модификация полиамидов и их композитов с целью оптимизации коэффициентов трения, можно выделить [6–13]. При этом компоненты подбирались таким образом, чтобы уменьшение коэффициента трения не приводило к значительному снижению механических характеристик, например, к снижению предела прочности и ударной вязкости.

Следует отметить, что состояние дел в области теоретических и экспериментальных исследований, а также формального обобщения материалов по полиуретанам и их композитам (в сравнении с полиамидами) в настоящее время гораздо менее систематизировано и стандартизировано, хотя имеется достаточное количество работ в этом направлении. Данный фактор в первую очередь следует объяснить многообразием химического состава термопластичных полиуретанов (ТПУ), представляющих собой сегментированные блок-сополимеры строения $(AB)_n$, где А – гибкие полиэфирные сегменты, а В – жесткие уретановые сегменты.

В работе [14] проведены исследования триботехнических свойств ТПУ с учетом их химического строения. При этом анализировались два типа ТПУ, а именно: на основе полиокситетрамети-

ленгликоля (ПОТМГ) с молекулярной массой 1000 и полибутиленгликольадипината (ПБГА) с молекулярной массой 2000, 1,4-бутандиола и 4,4-дифенилметандиизоцианата.

Коэффициент трения определялся на дисковой машине трения. Образец при этом имел диаметр 8 мм и высоту 10 мм, а в качестве контртела служил диск из стали 45 с твердостью по Роквеллу HRC=40–45 ед. и с шероховатостью рабочей поверхностью 0,63–1,25 мкм. Сила трения, а соответственно и коэффициент трения определялись с помощью тензометрической системы. При этом давление составляло 0,2 МПа, а скорость скольжения – 0,4 м/с.

На рис. 7 представлены кривые, характеризующие зависимость модуля упругости E_b и коэффициента трения f от содержания жестких сегментов $\varphi_{ж}$.

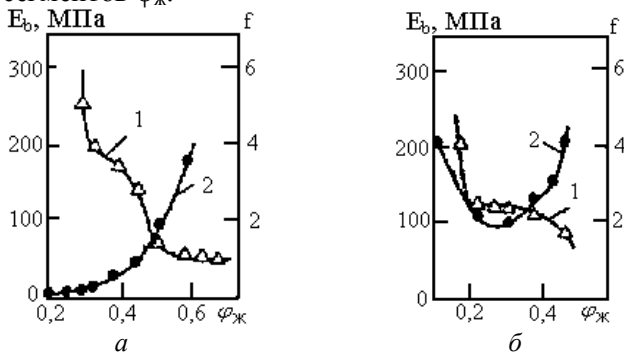


Рис. 7. Зависимости коэффициента трения (1 – f) и модуля упругости при растяжении (2 – E_b) от содержания жестких сегментов $\varphi_{ж}$ для ТПУ: a – на основе ПОТМГ; b – на основе ПБГА

Как показывают экспериментальные результаты, могут быть выделены две критические концентрации жестких сегментов. Первая, $\varphi_{жк1}$ – величина, обусловленная появлением непрерывной структуры (бесконечного кластера) и образованная микрофазой жестких сегментов (порог геометрической перколяции). Вторая, $\varphi_{жк2}$ – величина жесткого бесконечного кластера, характеризующая порог перколяции жесткости.

Между зависимостями f и E_b от $\varphi_{ж}$ для ТПУ на основе ПОТМГ наблюдается тесная корреляция, которая объясняется тем, что их изменение обусловлено степенью связности микрофазы жестких блоков, которая в свою очередь определяется величиной $\varphi_{ж}$.

При этом коэффициент трения, характеризующий степень взаимодействия поверхностей при трении, зависит от площади фактического контакта, откуда вытекает и соответствующая зависимость от модуля упругости (чем выше E_b , тем меньше площадь фактического контакта, а значит и величины f).

В случае ТПУ на основе ПБГА, наряду с высокомодульной микрофазой жестких сегментов, в их объеме присутствуют и высокомодульные микрофазы, состоящие из кристаллических гибких сегментов. Данная особенность структуры приводит к повышению модуля упругости, особенно при малых значениях $\varphi_{ж}$.

На рис. 8 представлены зависимости коэффициентов трения для ТПУ на основе разных комбинаций сложных полиэфиров (полибутиленгликоль-адипината ПБГА₂₀₀₀, полиэтиленгликольадипината ПЭГА₂₀₀₀, полиэтилен-бутиленгликольадипината ПЭБГА₂₀₀₀) а также на основе простого поли-эфира полиокситетраметиленгликольадипината ПОТМГ₁₀₀₀ без смазки и в присутствии воды.

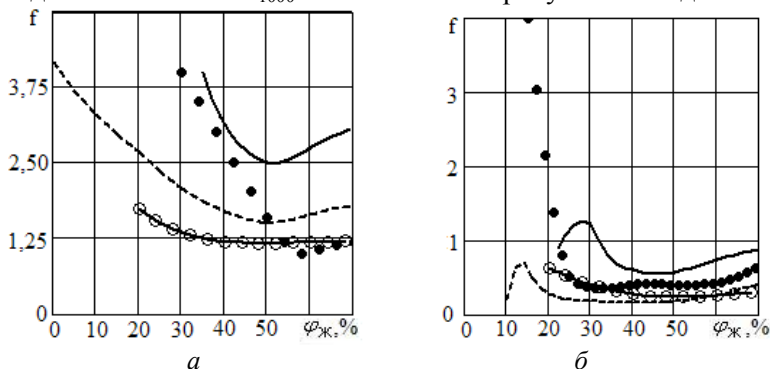


Рис. 8. Зависимости коэффициента трения от жестких сегментов для ТПУ: а – без смазки ($P = 0,2$ МПа, $V = 0,4$ м/с); б – в присутствии воды ($P = 0,2$ МПа, $V = 2,3$ м/с); ---- – ПБГА₂₀₀₀; БД: МДИ; — – ПЭГА₂₀₀₀; БД: МДИ; ооо – ПЭБГА₂₀₀₀; БД: МДИ; ••• – ПОТМГ₁₀₀₀; БД: МДИ

Как следует из рис. 8, все полиуретаны, синтезированные на основе сложных и простых полиэфиров в режиме трения без смазки имеют максимальные значения коэффициента трения при минимальных концентрациях жестких сегментов. При достижении концентрации жестких сегментов 40–50 % происходит стабилизация величины коэффициента трения для ТПУ данных составов, при этом они приобретают минимальные значения. С увеличением

концентрации жестких сегментов более 50 % наблюдается незначительное повышение коэффициента трения, что можно объяснить формированием энергетически напряженной структуры с низким сопротивлением к циклическим деформациям. Иной характер трения ряда ТПУ в присутствии воды, когда влияние температуры в зоне трения сведено до минимума. В этом случае у ТПУ на основе ПБГА₂₀₀₀ и ПЭГА₂₀₀₀ при минимальных концентрациях жестких сегментов отмечаются минимальные значения коэффициента трения. Затем с ростом $\varphi_{ж}$ коэффициент трения резко повышается. Такое поведение можно объяснить высокой упорядоченностью гибких сегментов данных систем ТПУ при минимальных концентрациях $\varphi_{ж}$. С дальнейшим ростом $\varphi_{ж}$ происходит постепенная стабилизация коэффициента трения всех систем ТПУ с достижением минимальных значений в концентрационном диапазоне $\varphi_{ж} = 30\text{--}40\%$.

На рис. 9 изображены зависимости коэффициента трения ТПУ от различных составов смесей на основе сложных и простых полиэфиров.

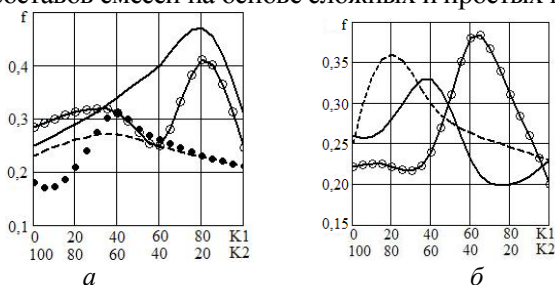


Рис. 9. Зависимости коэффициента трения ТПУ от различных составов смесей сложных и простых полиэфиров: *а* – - - - - ПБГА₅₀₀ (К1) и ПЭГА₂₀₀₀ (К2); — — — — ПБГА₅₀₀ (К1) и ПЭБГА₂₀₀₀ (К2); ооо – ПЭГА₂₀₀₀ (К1) и ПЭБГА₂₀₀₀ (К2); ••• – ВИТУР ТМ-0533-95 (К1) и ВИТУР ТМ-0333-90 (К2); *б* – - - - - ПОТМГ₁₀₀₀ (К1) и ПБГА₅₀₀ (К2); — — — — ПОТМГ₁₀₀₀ (К1) и ПЭБГА₂₀₀₀ (К2); ооо – ПОТМГ₁₀₀₀ (К1) и ПЭГА₂₀₀₀ (К2)

Особый интерес при проведении анализа и моделирования работоспособности элементов конструкций, изготовленных из полимерных материалов, представляют зависимости коэффициента трения от различных параметров (температуры, давления и скорости). Для различных марок полиамидов данные зависимости изображены на рис. 1, рис. 2 и рис. 4.

В рамках данной работы также проведены исследования по определению аналогичных зависимостей для одного из исходных полиуретанов и его модификации тонкодисперсным графитом марки С-1.

На рис. 10 представлены результаты выполненных исследований.

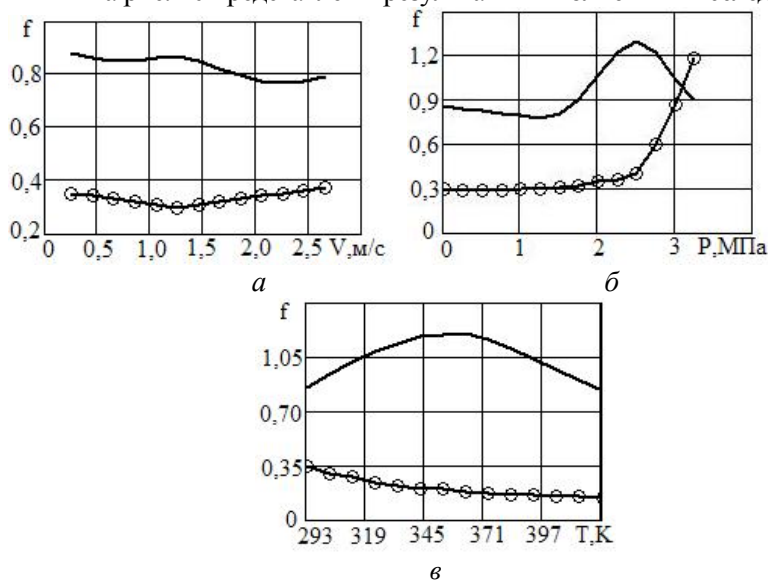


Рис. 10. Зависимости коэффициента трения от скорости V при $P = 0,35$ МПа (*a*), давления P при $V = 0,4$ м/с (*б*) и температуры T при $P = 0,35$ МПа и $V = 0,4$ м/с (*в*); — — исходный полиуретан; ооо — модифицированный полиуретан

Как видно из приведенных на рис. 10 графиков, модификация исходного полиуретана значительно снижает коэффициент трения для всех трех параметров, что дает повышение эксплуатационных свойств конструктивных элементов, выполненных из такого материала, в том числе и втулок подшипников скольжения.

Минимизация износа антифрикционных материалов.

Снижение коэффициента трения для материалов, работающих в узлах трения, является очень важной задачей, так как дает возможность значительно уменьшить энергоемкость машинных агрегатов. Однако, уменьшая коэффициент трения, следует следить за тем, чтобы при этом не уменьшалась износостойкость элементов в узлах трения.

Для материала, представленного на рис. 5 согласно с работой [4], характер зависимости износа от содержания терморасширенного графита приведен на рис. 11.

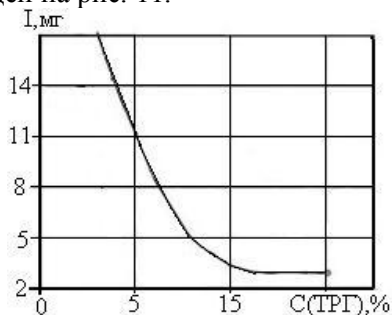


Рис. 11. Зависимость износа I для композита ФС-2/ТРГ от содержания ТРГ

Если сравнить графики на рис. 5 и рис. 11, то видим, что минимальное значение коэффициент трения имеет при 5 мас.%, но при этом его износ в 5 раз больше, чем у графитопласта, который содержит 15 мас.% ТРГ. Данный момент следует учитывать при оптимизации режимов работы с учетом особенностей конструктивного исполнения узлов трения.

Аналогичная зависимость износа для рис. 6, согласно с работой [5], представлена на рис. 12.

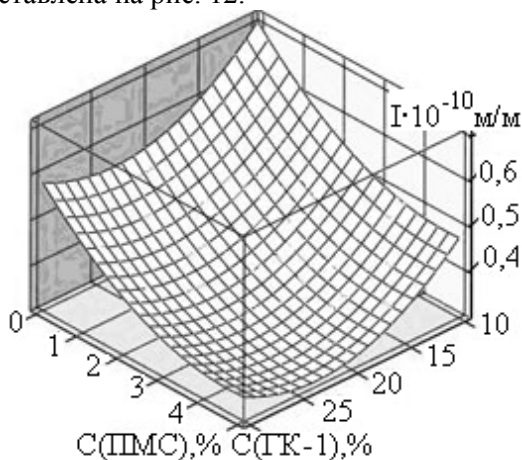


Рис. 12. Зависимости износа I от содержания графита ГК-1 и ПМС для композитов на основе ФС-2

Улучшение показателя износа обусловлено тем, что олигодиметилсилоксан в некоторых случаях используется в качестве высокоэффективной смазки. Кремнийорганический модификатор, который не совместился с фенилоном, попав в зону трения, облегчает процесс трения, что приводит к увеличению износостойкости и снижению коэффициента трения. Следует также отметить, что трение и износ полимерных материалов в значительной мере связаны с их деформационными свойствами. Поэтому повышение механических свойств полимерных систем на основе фенилона одновременно способствует улучшению антифрикционных характеристик. Зависимости изменения интенсивности износа для тех же систем ТПУ и режимов их испытаний, которые приведены на рис. 8 и рис. 9, представлены соответственно на рис. 13 и рис. 14.

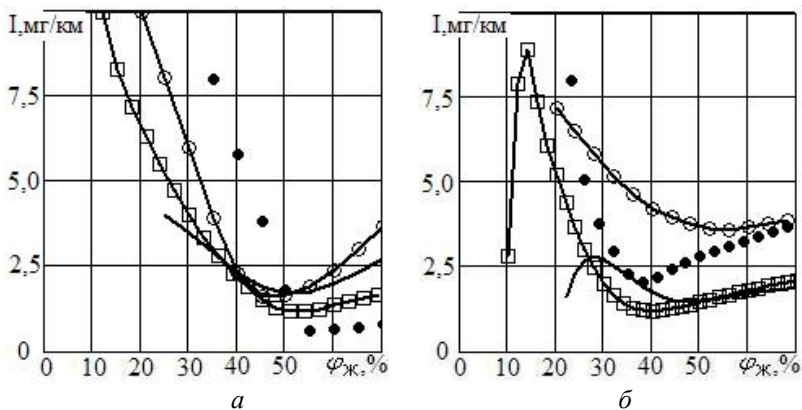


Рис. 13. Зависимости интенсивности износа ТПУ от жестких сегментов: а – без смазки ($P = 0,2$ МПа, $V = 0,4$ м/с); б – в присутствии воды ($P = 0,2$ МПа, $V = 2,3$ м/с): \square – \square – \square – \square – ПБГА₂₀₀₀: БД: МДИ; — — ПЭГА₂₀₀₀: БД: МДИ; \circ \circ \circ – ПЭБГА₂₀₀₀: БД: МДИ; \bullet \bullet \bullet – ПОТМГ₁₀₀₀: БД: МДИ

При минимальных концентрациях для ПБГА₂₀₀₀ в режиме трения без смазки интенсивность износа, также как и коэффициент трения, имеет максимальные значения. Опять же, как и для коэффициента трения, при достижении концентрации жестких блоков около 40 % наблюдается стабилизация величины интенсивности износа.

Интенсивность износа полиуретанов на основе ПЭГА₂₀₀₀ с содержанием $\varphi_{ж} = 11$ –15 %, по аналогии с ПБГА₂₀₀₀, при трении в присутствии воды имеет небольшие значения. При увеличении $\varphi_{ж}$

до 27 % степень кристалличности данных материалов уменьшается, а износ приобретает катастрофический характер; дальнейшая тенденция в снижении величины интенсивности износа связана уже с появлением непрерывной микрофазы жестких сегментов и характерна для всех без исключения систем ТПУ.

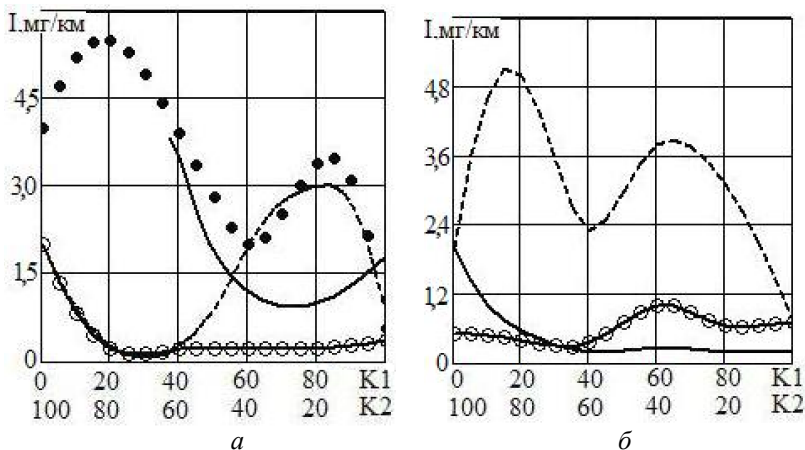


Рис. 14. Зависимости интенсивности износа ТПУ от различных составов смесей сложных и простых полиэфиров: *a* – ---- – ПБГА₅₀₀ (К1) и ПЭГА₂₀₀₀ (К2); — – ПБГА₅₀₀ (К1) и ПЭБГА₂₀₀₀ (К2); ooo – ПЭГА₂₀₀₀ (К1) и ПЭБГА₂₀₀₀ (К2); ••• – ВИТУР ТМ-0533-95 (К1) и ВИТУР ТМ-0333-90 (К2); *б* – ---- – ПОТМГ₁₀₀₀ (К1) и ПБГА₅₀₀ (К2); — – ПОТМГ₁₀₀₀ (К1) и ПЭБГА₂₀₀₀ (К2); ooo – ПОТМГ₁₀₀₀ (К1) и ПЭГА₂₀₀₀ (К2)

Сравнивая полиуретаны на основе ПБГА₂₀₀₀ и ПЭГА₂₀₀₀, можно наблюдать очевидную корреляцию между их степенью кристалличности и интенсивностью износа ТПУ в условиях трения в присутствии воды. Так при 25 % кристалличности у ПБГА₂₀₀₀ интенсивность износа порядка 3 мг/км, а при 10 % кристалличности – в 2,5–3 раза больше. При этом следует отметить, что влияние жестких сегментов не играет большой роли, поскольку их концентрация в двух составах не больше 11 %.

Существенным недостатком ТПУ является их низкая гидролитическая стойкость в условиях фрикционного контакта. Предварительные исследования показали, что величина износа ТПУ при введении в зону контакта воды увеличивается больше чем на порядок [15].

Использование при синтезе полиуретанов гидролитически стойкого простого полиэфира не приводит к существенному улучшению их свойств. В работе [16] рассмотрены способы повышения износостойкости ТПУ, в том числе и при эксплуатации в условиях гидродинамического контакта, путем обработки исходных полимеров тепловыми полями различной интенсивности. При этом установлено, что такой способ воздействия на полиуретаны способствует значительному снижению величины износа.

Дальнейшее развитие данного способа нашло в использовании ультрафиолетового и рентгеновского воздействия на износостойкость ТПУ в условиях гидродинамического контакта.

Для исследований выбран полиуретан на основе сложных полиэфиров: ПЭГА₂₀₀₀:БД:МДИ=1:4:5 и ПЭБГА₂₀₀₀:БД:МДИ=1:3:4. Полученные образцы обрабатывались с использованием источника ультрафиолетового излучения ПРК-400. Обработка рентгеновским излучением проводилась на установке РУМ-17 с помощью источника ДРТ-1000 мощностью 2,64 кВт с разным временем экспозиции.

Выполненные исследования позволили установить, что термопластичные полиуретаны, обработанные излучением, имеют более высокую износостойкость в сравнении с исходными полимерами. При этом износостойкость в условиях гидродинамического контакта увеличивается более чем на порядок, а при трении без смазки – в 2–3 раза.

Рост износостойкости можно объяснить протеканием процессов структурирования полимера под действием излучения как в результате слабого «сшивания» линейных молекул формирующимися новыми кислородными связями, так и в результате возникновения межмолекулярных сшивок при разрыве связей уретановой группировки.

Зависимости износостойкости полиуретанов от длительности и дозы как ультрафиолетового, так и рентгеновского излучений представлены в табл. 1 и табл. 2.

В результате выполненных экспериментов и анализа полученных данных установлено, что оптимальные режимы обработки образцов на основе ПЭГА находятся в области больших доз и времени обработки, чем для образцов на основе ПЭБГА. Можно предположить, что это связано с протеканием процессов структурирования полимера в более вязкой среде [17]. Также установлено, что

вследствие рентгенопрозрачности образцов ТПУ при обработке данным видом излучения, процессы структурирования происходят не в поверхностных слоях, а по всему объему.

Таблица 1

**Интенсивность износа ТПУ в воде от дозы
ультрафиолетового излучения**

Расстояние до источника, м	Доза ультрафиолетового излучения*, К·лм·с	Интенсивность износа, мг/км	
		1	2
0,1	126,0	0,5	0,4
0,2	31,5	0,3	0,3
0,4	7,9	0,4	0,05
0,6	3,5	0,6	0,2

Примечание: * – при мощности 400 Вт и продолжительности 2 ч;
1 – ПЭГА₂₀₀₀:БД:МДИ; 2 – ПЭБГА₂₀₀₀:БД:МДИ.

Таблица 2

**Интенсивность износа ТПУ от времени обработки
рентгеновским излучением**

Время обработки, сек.	Интенсивность износа, мг/км	
	1	2
0	4,01	2,65
1,5	2,42	1,81
3	1,63	1,18
4,5	0,85	0,81
6	0,38	0,64
7,5	0,41	0,69
9	0,76	0,98

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных работ установлено, что обработка ТПУ ультрафиолетовым и рентгеновским излучением позволяет более чем на порядок повысить износостойкость данных материалов при эксплуатации в присутствии воды.

Выводы:

1. Рассмотрены основные направления, связанные с модификацией и наполнением композитных материалов с целью улучшения трибологических характеристик.
2. Предложены способы и режимы оптимизации коэффициента трения для полиуретановых композитов.

3. Разработаны методики для минимизации износа различных структур термопластичных полиуретанов.

Список литературы

1. *Теплофизические* и реологические характеристики и коэффициенты трения наполненных термопластов. Справочник / Пахаренко В.А., Зверлин В.Г., Привалко В.П. и др. – К., Наука, 1983. – 280с.

2. *Clay exfoliation* and organic modification on wear of nylon 6 nanocomposites processed by different routes / Dasari A., Yu Z.-Z., Mai Y.-W. and all // Composites Science and Technology. – 2005. – Vol. 65. – P. 2314-2328.

3. Friction and Wear Studies on Nylon-6/SiO₂ Nanocomposites / Garcera M., Rooij M., Winnubst L. and all // J. of Applied Polymer Science. – 2004. – Vol.92. – P.1855-1862.

4. Буря А.И., Кудина Е.Ф., Гаюн Н.С. Влияние природы и содержания наполнителей на свойства композитов на основе фенилона // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2010. – № 1. – С.55-60.

5. Кузьяев И.М., Сытар В.И. Оптимизация механических и трибологических свойств композитных материалов на основе полиамидов // Вопр. химии и хим. технологии. – 2012. – № 2. – С.97-106.

6. Rajesh J.J., Bijwe J. Influence of fillers on the low amplitude oscillating wear behavior of polyamide 11 // Wear. – 2004. – Vol.256. – P.1-8.

7. *On the mechanisms* of abrasive wear of polyamide fibers / Cayer-Barrioz J., Mazuyer D., Kapsa P.A. and all // Wear. – 2003. – Vol.255. – P.751-757.

8. Effect of impinging velocity on the erosive wear behavior of polyamides / J.J. Rajesh, J. Bijwe, B. Venkataraman, U.S. Tewari // Tribology International. – 2004. – Vol.37. – P.219-226.

9. Термостойкие триботехнические материалы на основе модифицированных ароматических полиамидов и углеродных наполнителей / В.И. Сытар, А.И. Буря, А.Н. Дудка, Д.С. Данилин // Problems of Tribology. – 2003. – № 3 (4). – С.145-148.

10. Сытар В.И. Опыт применения композиционного материала в химическом машиностроении // Вопр. химии и хим. технологии. – 2005. – № 2. – С.209-212.

11. *Polymeric Nanocomposites* for Tribological Applications / D.L. Burris, B. Boesl, G.R. Bourne, W.G. Sawyer // Macromol. Mater. Eng. – 2007. – Vol.292. – P.387-402.

12. Eriksson M., Jacobson S. Tribological surfaces of organic brake pads // Tribology International. – 2000. – Vol.33. – P.817-827.

13. Ostermeyer G.P. On the dynamics of the friction coefficient // Wear. – 2003. – Vol.254. – P.852-858.

14. *Взаимосвязь* химического состава, триботехнических и деформационно-прочностных свойств термопластичных полиуретанов / Лету-

новский М.П., Кураченков В.Н., Анисимов В.Н. и др. // Пластические массы. – 1989. – № 7. – С.44–47.

15. *Влияние* концентрации жестких блоков на износостойкость и модуль упругости термопластичных полиуретанов / Летуновский М.П., Анисимов В.Н., Страхов В.В. и др. // Пластические массы. – 1987. – № 3. – С.23–24.

16. *Влияние* тепловой обработки на трение и изнашивание термопластичных полиуретанов / Кураченков В.Н., Анисимов В.Н., Страхов В.В. и др. // Проблемы трения и изнашивания: Респ. межвед. научн.-техн. сб. – 1985. – Вып.28. – С.89–92.

17. *Страхов В.В., Кафенгауз А.П., Жаркова И.А.* Некоторые закономерности синтеза полиуретановых термопластов // Пластические массы. – 1974. – № 6. – С.12–14.

Анісімов В. М., Кузяєв І. М. **Аналіз трибологічних властивостей полімерних матеріалів та їх композитів, що застосовуються у підшипниках ковзання** // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 58. – С. 102–118.

Приведений аналіз основних трибологічних властивостей для термопластичних полімерних матеріалів та їх композитів, які знайшли найбільше застосування у вузлах підшипників ковзання. Оцінено вплив різних наповнювачів, у тому числі із застосуванням наноматеріалів, на трибологічні властивості поліамідних та поліуретанових композитів. Запропоновано методики оптимізації коефіцієнтів тертя та зносостійкості термопластичних композиційних матеріалів, які застосовуються у підшипникових вузлах.

Рис. 14, табл. 2, список літ.: 17 найм.

Analysis of tribological properties of polymer materials and their composites, which are used in plain bearings.

Analysis of the main tribological properties for thermoplastic polymer materials and their composites, which are used most frequently in bearing units, is done. The influence of different fillers, including ones with using nanomaterials, on tribological properties of polyamide and polyurethane composites is estimated. Methods of optimization the friction coefficients and wear resistance of thermoplastic composite materials, which are used in bearing units, are proposed.

Стаття надійшла до редакції 17.04.2012