

УДК 621.891:539.375(043.2)

В. Хуфенбах¹, К. Кунце¹, Н. Модлер¹, А.У. Стельмах²¹ІЛК, Технический университет Дрездена²Национальный авиационный университет

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕГКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ МАШИН

Совместными триботехническими испытаниями в лабораториях ІЛК ТУ Дрезден (Германия) и НАУ (Украина) доказана возможность и перспективность использования армированного волокнами по технологии ІЛК ТУ Дрезден полипропилена на основе полуфабриката TWINTEX®. Установлено существенное повышение износостойкости деталей при скольжении

Введение. Современное машиностроение неуклонно требует энергоресурсосбережения путем уменьшения массы деталей механизмов. На смену металлическим деталям конструкций приходят легкие полимерные элементы [1-5]. Это позволяет существенно снизить энергетические затраты на транспорте и таким образом улучшить экологическую обстановку. Использование лёгких трибосистем наиболее актуально и перспективно в авиационной и космической технике [6].

Технологии изготовления полимерных деталей машин позволяют существенно (в несколько раз) облегчать конструкции при сохранении их функциональных свойств, в т.ч. прочности, надежности и долговечности. Неподвижные элементы конструкций из легких полимерных материалов на сегодня широко используются в различных видах транспорта и других машинах. Применение таких материалов в качестве шарниров и узлов трения с позиций трибологии контактного взаимодействия поверхностей полимерных деталей требует глубоких исследований.

Известно, что полипропилен (ПП) является одним из наиболее перспективных материалов для изготовления деталей узлов трения (трибосистем). ПП - относительно недорогая стандартная пластмасса, прочностные характеристики которой считаются неудовлетворительными, но их можно значительно улучшить путем армирования стекловолокном. Такой подход открывает новые возможности его применения в узлах трения, где до сих пор использовались более дорогие полимерные материалы, например, полиамид или поликапроамид. Как перспективные, рассматриваются ПП-гомополимеры, армированные текстильными стекловолокнами.

Результаты исследования. В рамках представленной работы для сравнения с другими модификациями полипропилена был выбран комбинированный материал на основе полуфабриката TWINTEX®.



Рис. 1. Трибологическая пара вал-штука в аксиально не фиксированных шлицевых соединениях: а) «композитный вал – стальная штука»; б) «композитный вал – композитная штука»

Конструктивные элементы из текстильно-армированного полипропилена на практике в ряде случаев могут отличаться высокой сложностью и функциональной интегрированностью, причем инженерия всё чаще сталкивается с ограниченными сведениями о трибологических свойствах этих материалов. Так, например, подвижное соединение вала и втулки (рис. 1) в целом удовлетворяет конструктивным требованиям к композитным материалам, где контактирующие поверхности в месте посадки должны перемещаться аксиально, т.е. реализовывать реверсивное трение скольжения.

Использование дешевых и легких полимерных материалов в узлах трения возможно только при условии улучшения их механических свойств, в том числе перераспределения контактных напряжений с учетом условий эксплуатации трибосистем. Как проектирование, так и создание трибологически-нагруженных узлов из новых материалов требует лабораторного моделирования всех звеньев конструктивно-технологических процессов от идеи до ее верификации. Для этого необходимо создать опорную базу данных как механических, так и трибологических свойств, включающих характеристические и функциональные параметры полимерных материалов, получаемых различными технологическими приемами.

Целевое изменение исходных механических и трибологических свойств полиэтиленовых композиций с научно обоснованными концептами связано с увеличением стоимости серийных изделий, однако это может быть оправдано огромным потенциалом лёгких и прочных машин в перспективе.

Матрицей композита служил полипропилен (PP1 HD 120M производства Borealis), обладающий сбалансированными механическими свойствами. Для реализации хорошей адгезии между волокном и матрицей полипропилен-гомополимер был дополнительно модифицирован путем насыщения ангидридом малеиновой кислоты (2 % масс. Exxelor 1015 производства Exxon Mobil Corporation) [1].

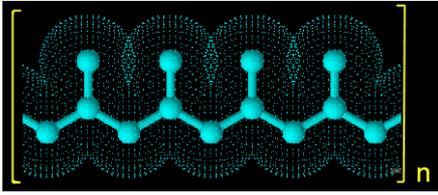
Полипропилен-сополимер Moplen EP240T (LyondellBasell Industries), как материал сравнения, также был модифицирован вышеуказанным веществом, повышающим прочность сцепления компонентов. Армирующим материалом служили стекловолокна класса E, произведенные и шлихтованные в институте Leibniz-Institut Polymerforschung Dresden e.V. (IPF), г.Дрезден.

Для проведения трибологических исследований систем, созданных на базе текстиля из бесконечных ПП-волокон, использовался двухмиллиметровый пластинчатый полуфабрикат коммерческой фирмы Vetrotex. Также применялся продукт TWINTEX® P PP60 2970 1/1 BF с такими свойствами: составная часть стекловолокна – 60 % масс.; тип армирующего материала – черная стекло-ровинг-ткань (полотняное плетение, 50/50%), удельный вес 1485 г/м².

Образцы, армированные короткими стекловолокнами (30% волокна), изготавливались литьем под давлением, причем гранулят ПП производился компаундированием на экструдере с двойной улиткой. На первом этапе изготовления однонаправленных плетений к филаменту сопрягался ПП, как матричный материал, который затем перерабатывался со стекловолокнами в гибридную пряжу. Однонаправленность волокна (67%) достигалась с помощью специальной технологии обмотки, а их внедрение в пластинчатые полупродукты производилось горячим прессованием.

Исследования механических свойств матричных материалов показали, что армирование ПП стекловолокном повышает его прочность и жесткость. Полученные результаты (модули растяжения, ползучести, потеря, упругости и др.) вносились в базу данных в виде таблицы на примере изотактического ПП (табл. 1).

Таблица 1.

Краткая характеристика механических свойств изотактического гомополимера			
Структура (изотактический ПП)		Описание и свойства	
		ПП-гомополимеризат может иметь в макромолекуле как изотактическое (частично кристаллическая структура – 70-80%), так и синдиотактическое или атактическое расположение боковой группы метила. Синдиотактические и атактические ПП менее жесткие, низкокристаллические, более прозрачные, вязкие и ударопрочные.	
Поведение материалов при длительной статической или квазистатической нагрузках			
Напряжение при растяжении σ_z , [N/mm ²]	Модуль ползучести E_c , [Н/мм ²]		Устойчивость против ползучести C_c
	$E_{C(1)}, (1 \text{ h})$	$E_{C(3)}, (1000 \text{ h})$	
1	955	560	0,58
2	850	495	
5	795	460	
Отношение для аппроксимации, интерполяции или экстраполяции модуля ползучести $E_c(t)$: $E_c(t) = E_{C(1)} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot (1 - c_c) \cdot \lg \left(\frac{t}{t_1} \right) \right]$			

На мультифункциональном испытательном стенде ILK TU (г. Дрезден) были проведены сравнительные испытания указанных выше материалов на триботехнические свойства, как по промышленному стандарту DIN ISO 7148, так и в условиях, близких к реальным режимам работы узлов трения. В качестве примера на рис.2,(а) представлена модель радиального подшипника скольжения с линейным контактом типа "колодка-кольцо".

Основные параметры процесса трения в эксперименте (температура и момент сил трения) контролировались во время испытаний, а распределение износа по дорожке трения измерялось после них. Для оценки структуры износа, как правило, используют различные современные оптические системы. В стандартных методиках трибологических испытаний (модельные испытательные системы согласно ISO 7148 немецкого промышленного стандарта) для автоматизации анализа износа применяются разработанные в институте легких конструкций (ILK) специальное устройство и программное обеспечение. На рис.2,(б) приведены внешний вид измерительной системы μScan и результаты измерений до и после испытаний (рис.2,в). С помощью данного оборудования и соответствующего программного обеспечения можно не только визуализировать дорожку трения и изношенного участка, но и точно определить распределение износа и характерные его значения в виде коэффициента износа.

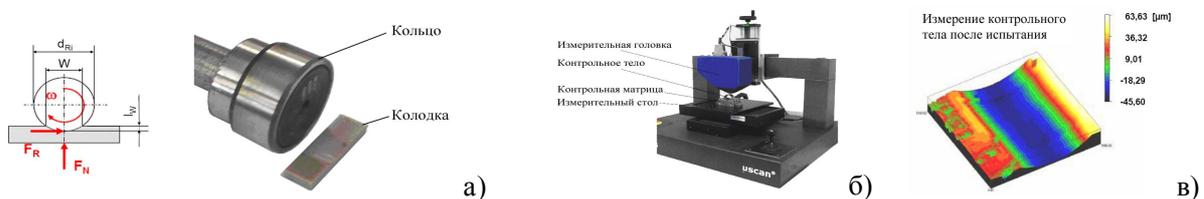


Рис. 2. Схема и модель радиального подшипника скольжения стального вала по колодке (образцы ПП) трибологической испытательной системы "колодка-кольцо" по стандарту G176-03 ASTM или ISO 7148-2 (а), микроскоп μScan (б) и вид дорожки скольжения с износом образца (в)

Триботехническим испытаниям подвергались ПП, армированные коротковолокнистыми нитями, а также ПП с длинными волокнами, ориентированными под различными углами между направлением скольжения и направлением волокон (0° , 45° , 90°).

Результаты испытаний (рис. 3) показали, что армирование текстильными стекловолокнами ПП-гомополимеров является эффективным способом повышения износостойкости и уменьшения трения. Уже сегодня существует высокий спрос современного машиностроения на лёгкие и дешёвые трибосистемы. Установлено, что армирование стекловолокном, наряду с улучшением характеристик прочности и жёсткости, положительно влияет и на трибологические свойства.

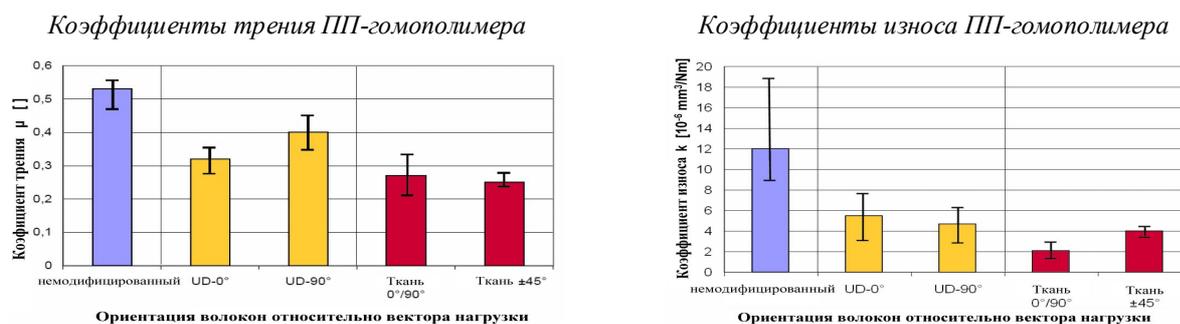


Рис. 3. Сравнение трибохарактеристик ПП в зависимости от ориентации стекловолокон

Так, существенно повышается износостойкость (при условии, что сопрягаемая деталь пары трения изготовлена из закалённой полированной стали). Зависимость коэффициента трения от угловой ориентации армирующих волокон позволяет сделать предположение о необходимости учета влияния газовой смазки.

При трении в граничных слоях воздуха процессы подчинены компрессионно-вакуумному механизму [7], наблюдавшемуся в среде жидких смазочных материалов с конфузорным сжатием граничных слоёв и их вакуумированием в диффузорных областях контакта. Предполагается, что весьма перспективным путём дальнейшего повышения эффективности лёгких полимерных трибосистем может стать укладка на поверхностях трения длиноволокнистых нитей в определённом, наиболее трибологически эффективном, 3D плетении с соответствующей ориентацией микроканалов. По сути это позволит управлять вторичными течениями граничных слоёв и перераспределением давления в трибоконтакте. Оптимизация последних приведёт к существенному повышению износостойкости и уменьшению трения в полимерных трибосистемах.

Выводы. Таким образом, применение лёгких материалов для изготовления деталей узлов трения становится новым и перспективным направлением трибологии лёгких полимерных материалов.

1. Hufenbach, W.; Biwje, J.; Langkamp, A.; Kunze, K.: Development of Bearing Material and High Performance Bearings for Dry Applications Under Harsh Operating Conditions, *11th European Conference on Composite Materials*, May 31 – June 3, 2004, Rhodes, Greece, S. 413.
2. Brodowsky, H.M.; Jenschke, W.; Mäder, E.: Characterization of Interphase Properties by Frequency-Dependent Cyclic Loading of Single Fibre Model Composites, *Journal of Adhesion Science and Technology* 24 (2010), S. 237–253.
3. Michaeli, W.: Einführung in die Kunststoffverarbeitung, *Carl Hanser Verlag*, 2007.
4. Kunz, J.: Kriechbeständigkeit – ein Kennwert für das Kriechverhalten, *Kunststoffe* 1/2004, S. 330–31.
5. Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren, 3. Auflage, *Hanser Verlag*, München Wien, 2007.
6. Hufenbach, W.; Kunze, K.: Tribologische Kenngrößen in kurzer Zeit ermitteln, *Industrieanzeiger* 38 (1998), S. 60–61.
7. Стельмах А.У. Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования. – Деп. В ГНТБ Украины 14.04.2009, №20 – Ук2009. – 43с.