

УДК 621.589

В.Хуфенбах, А.Стельмах, К.Кунце, Н.Модлер

Институт лёгких материалов и полимерных технологий (ILK), Технический университет Дрездена
Национальный авиационный университет (НАУ), Киев, Украина

ТРИБОЛОГИЯ ЛЕГКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНЯЕМЫХ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ МАШИН

Совместными триботехническими испытаниями в лабораториях ILK TU Дрезден (Германия) и НАУ (Украина) доказана возможность и перспективность использования армированного волокнами по технологии ILK TU Дрезден полипропилена на основе полуфабриката TWINTEX®. Установлено существенное повышение износостойкости деталей при скольжении. Ключевые слова: полипропилен, узлы трения, трибосистема, гомополимеры, армирование

Введение и постановка задачи исследований. Современное машиностроение неуклонно развивается по пути ресурсоэнергосбережения путем уменьшения массы машин и механизмов. На смену металлическим деталям конструкций приходят легкие полимерные элементы. Это позволяет существенно снизить энергетические затраты на транспорте и, таким образом, улучшить экологическую обстановку. Технологии изготовления полимерных деталей машин позволяют существенно (в несколько раз) облегчать конструкции при сохранении их функциональных свойств, а именно - прочности, надежности и долговечности. Если неподвижные элементы конструкций из легких полимерных материалов уже широко используются в различных транспортных средствах и других машинах, то применение таких материалов в качестве трущихся деталей узлов трения машин является весьма перспективным и актуальным, с точки зрения трибологии контактного взаимодействия поверхностей полимерных деталей.

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

В рамках представленной работы для сравнения с другими модификациями полипропилена был использован комбинированный материал на основе полуфабриката TWINTEX®. В ходе исследований показано, что, наряду с повышением прочности и жесткости, армирование ПП стекловолокном также положительно влияет на его трибологические свойства.

Полипропилен относится к стандартным пластмассовым материалам, обладающим сравнительно низкой ценой, обусловленной отсутствием определенных параметров структуры, но имеющим широкий технико-прикладной спектр свойств. Низкая температурная и механическая стойкость этого интересного материала ограничивают его использование в конструкциях транспортного машиностроения с низкими и средними нагрузками. В общем, трибологические характеристики не модифицированного полипропилена оцениваются как относительно низкие. Поэтому в данной работе использовался способ улучшения большинства механических и тепловых качеств технических пластмасс, в том числе полиамида или полиацетилена, заключающийся в их армировании стекловолокном или другими короткими волокнами, например, можно армировать короткими волокнами с помощью технологии литья под давлением. Во многих технических изделиях из волокнисто-армированных термопластов волокна находятся в произвольно-ориентированном состоянии. Эти волокна очень короткие и в большинстве случаев их свойства не могут быть использованы в полной мере. Благодаря возможности осуществлять плетение полипропилена одновременно с также недорогим стекловолокном, такая гибридная пряжа положена в основу изготовления текстильно-армированных комбинированных материалов из ПП. Составы подобного рода обладают, по сравнению с другими группами материалов, большей гибкостью приспособления структуры материала к внешним нагрузкам и тем самым хорошо соответствуют и обеспечивают

комплексные требования, предъявляемые к конструкциям лёгкого машиностроения с оптимальным составом материалов. На основании последних достижений в области текстильной техники и технологий обработки, уже сегодня возможно изготовление комплексных конструкций со сложной геометрией из смеси полипропилена и стекловолокна с определенным армированием, учитывающим направление действующей нагрузки. Таким образом, могут быть охвачены области производства узлов трения, которые до сих пор оставались уделом дорогих конструкционных высокопрочных пластмасс. Примером может служить обшивка сидения легкового автомобиля (табл.1), при изготовлении которой, наряду с текстильным армированием ПП, существенную роль играет смесь материалов в виде экструдированной массы из длинных волокон и полипропилена, которая формируется изостатической горячей штамповкой.

Конструктивные элементы из текстильно-армированного полипропилена на практике в большинстве случаев отличаются высокой сложностью и функциональной интеграцией, причем инженерия всё чаще сталкивается с трибологическими свойствами этих материалов. Например, подвижное соединение вала и втулки (табл. 2), удовлетворяет конструктивным требованиям к композитным материалам, где контактирующие поверхности в месте посадки должны аксиально перемещаться, т.е. реализовывать реверсивное трение скольжения.

Таблица 1

Обшивка сидения легкового автомобиля из полипропилена, армированного текстилем и длинными волокнами



Таблица 2

Трибологические пары «вал-втулка» в аксиально не фиксированных шлицевых соединениях



Другим примером важности и необходимости определения трибологических свойств полимерных материалов служат специальное горячее формование и создание свариваемых связей ПП и текстилей для интеграции шарнира в конструктивных элементах. На рис. 1. показаны этапы процесса монтажа вращаемой оси шарнира в заготовленную структуру из термопласта, армированную текстилем.

Таким образом, использование дешевых и легких полимерных материалов в узлах трения, как весьма перспективное направление, представляет собой сложную задачу, которую можно решить только путем подробного анализа механических свойств материалов, в том числе распределения контактных напряжений с учетом условий эксплуатации данного узла трения. Как проектирование, так и создание многофункциональных легких механических конструкций с интегрированными трибологически-нагруженными компонентами можно реализовать только путем подробного анализа

всех звеньев конструктивно-технологических процессов от идеи до ее верификации. Для этого необходимо создать опорную базу данных как механических, так и трибологических свойств в форме характеристических функциональных величин полимерных материалов, получаемых различными технологическими приемами.

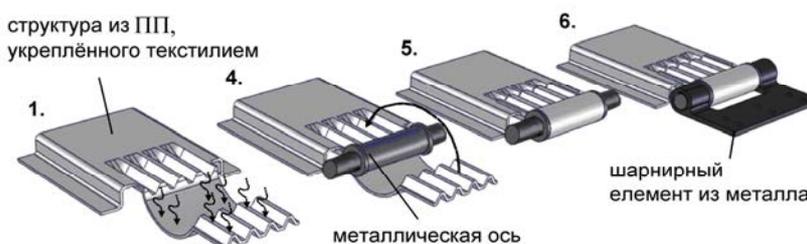


Рис. 1. Концепция и этапы технологии изготовления шарнира с использованием текстиля:

1 - нагревание зоны деформации; 2 - позиционирование металлической оси и образования петли путем геометрического замыкания; 3 - сплошное соединение петли; 4 - монтаж других встраиваемых частей

Исследования целенаправленного изменения исходных механических и трибологических свойств полиэтиленовых композиций с научно обоснованными концептами приводят к возникновению добавочной стоимости серийных изделий, однако, это полностью оправдывается высоким потенциалом производства и эксплуатации лёгких и прочных машин будущего.

Основные характеристики материала. Исходные материалы. В качестве матрицы использовался полипропилен (PP1 HD 120M производства Borealis), выбранный благодаря его хорошо сбалансированным механическим свойствам. Для реализации хорошей адгезии между волокном и матрицей полипропилен-гомополимер был дополнительно модифицирован полипропиленом, насыщенным ангидридной малеиновой кислотой (2 % масс. Exxelorg 1015 производства Exxon Mobil Corporation) [1].

Полипропилен-сополимер Moplen EP240T (LyondellBasell Industries), применяемый в качестве материала сравнения, также был модифицирован вышеуказанным веществом, повышающим прочность сцепления.

Армирующим материалом служили стекловолокна класса E, произведенные и шлифованные в институте Leibniz-Institut Polymerforschung Dresden e.V. (IPF), г.Дрезден.

Для проведения трибологических исследований систем, созданных на базе текстиля из бесконечных волокон полипропилена, использовался двухмиллиметровый пластинчатый полуфабрикат коммерческой фирмы Vetrotex. В частности, здесь был использован продукт TWINTEX® P PP60 2970 1/1 BF со следующими свойствами:

- составная часть стекловолокна: 60 % массы;
- тип армирующего материала: стекло-ровинг-ткань (полотняное плетение, 50/50%), удельный вес 1485 г/м², черной окраски.

Подготовка образцов. Изготовление образцов, армированных короткими стекловолокнами (30% волокна), осуществлялось путем литья под давлением, причем гранулят полипропилена производился компаундированием на экструдере с двойной улиткой.

Изготовление однонаправленных плетений осуществлялось в несколько этапов. На первом этапе к филаменту сопрягался полипропилен, как матричный материал, который затем перерабатывался вместе со стекловолокнами в гибридную пряжу. Однонаправленность волокна достигалась с помощью специальной технологии обмотки, а их внедрение в пластинчатые полупродукты производилось горячим прессованием. При этом внедренная масса волокна составляла 67%.

Последующая обработка образцов, необходимая для испытаний, производилась путем удаления стружки из полуфабрикатов, сформированных литьём под давлением или горячим прессованием.

Механические свойства матричных материалов. Для инженера, работающего с новыми материалами, сведения об их механических свойствах имеют первостепенное значение. На стадии конструирования деталей с использованием полимерных материалов требуется сравнительная оценка их механических свойств в виде краткой характеристики, приведенной ниже в виде таблиц. В связи с тем, что полипропилен, как и все термопластические материалы, обладает выраженными температурно-зависимыми высоко-упругими свойствами, применение «постоянных характеристик» проблематично.

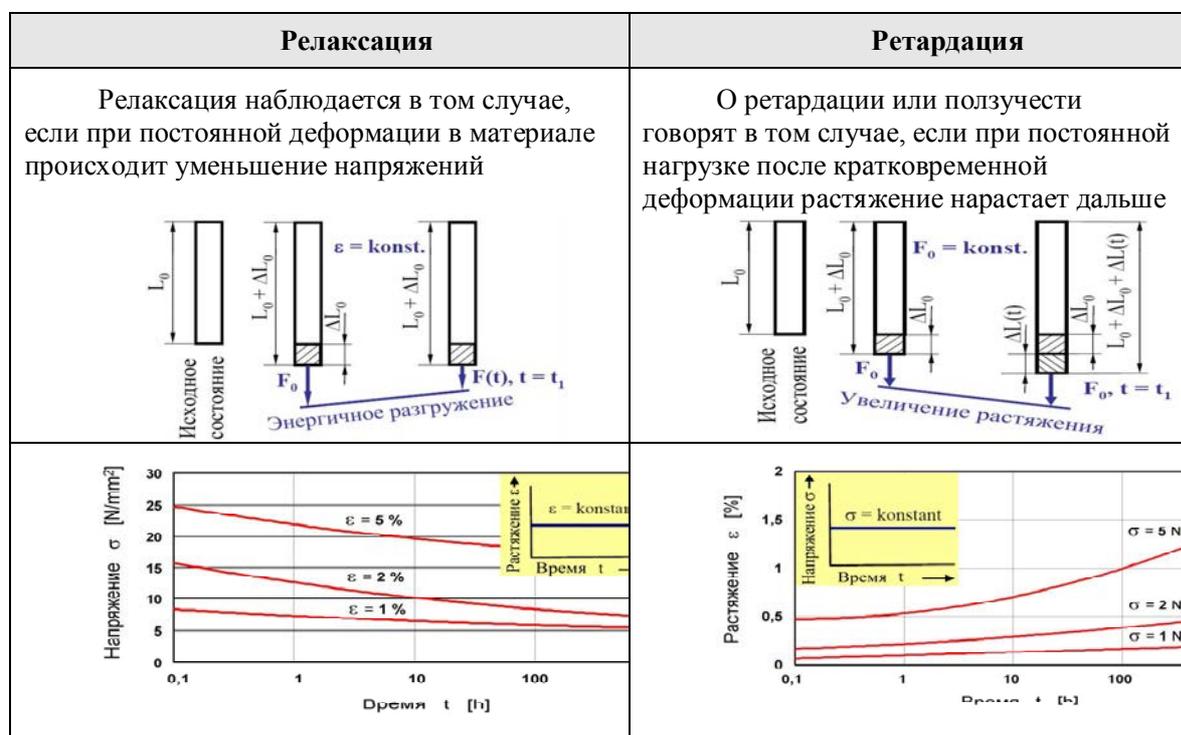
Поэтому, в отличие от металлических конструкционных материалов, в пластмассах под влиянием внешних механических нагрузок происходят деформации, которые можно разделить на следующие компоненты:

- реверсивные спонтанные растяжения, имеющие чисто эластичный характер;
- высокоупругие деформации, реверсивные во времени (релаксация деформации);
- необратимые в зависимости от времени вязкие деформации.

Такое поведение материала объясняется специфичной цепочной структурой макромолекул полипропилена, вследствие чего деформации полимеров обусловлены процессом реструктуризации. При этом звенья цепочек молекул соскальзывают одна за другой, что, в частности, и ведет к появлению вязкой деформации. Наступающее при этом изменение энтропии, а также взаимодействие молекул между собой, в частности в кристаллических областях термопластов, объясняет возникающее эластичное поведение материала. Это значит, что при статической или квазистатической долговременной нагрузке, в частности, в термопластических, синтетических материалах, таких как полипропилен, встречаются более или менее выраженные процессы ползучести. Принципиально такого рода поведение деформации можно описать пояснениями, приведенными в табл. 3 [4]:

Таблица 3

Поведение деформации полипропилена



Получение функций ползучести или релаксации обычно иллюстрируют диаграммой «время – напряжение», причем для феноменологических описаний поведения долговременной деформации в большинстве случаев находит применение подход Findley или простое потенциальное

преобразование. Создание и корректировка технической базы данных механических свойств материалов достаточно трудоемкий процесс. Поэтому для упрощенного описания механических свойств в данном случае может использоваться предложенный Кунце параметр сопротивления материала ползучести:

$$c_c = \frac{E_{C(t_3)}}{E_{C(t_1)}} \quad (1)$$

С помощью данного параметра можно наглядно сравнивать угол наклона ползучести полипропилена и других пластмасс при одном и том же уровне напряжений. Для этого задают модуль ползучести E_C материала сравнения, например из технической базы данных Campus-Datenbank, при определённом напряжении соответственно за время $t_1 = 1$ ч. и для $t_3 = 1000$ ч и представляют в табличной форме. В табл. 4 и 5 представлены краткие характеристики механических свойств полипропилена в виде банка данных, включающего параметр сопротивления ползучести. С помощью формулы (1) можно производить расчет жесткости материала в конкретных условиях путем интерполяции и экстраполяции во времени вплоть до предполагаемого и необходимого срока эксплуатации.

Подобную характеристику деформации полипропилена можно описать вязкоупругими моделями, которые, как правило, осуществляют линейную аппроксимацию упругой и вязкой характеристик материала. При этом обычно используют методы классической реологии для описания свойств полимерных материалов во времени, основанные на двух базовых моделях:

- линейно эластичный упругий элемент (элемент Гука; идеально-эластичный материал; твердое тело);
- демпферный элемент, зависящий от скорости (элемент Ньютона; идеально-вязкий материал; флюид).

Для описания вязкоупругого поведения деформации пластмасс эти элементы соединяют последовательно или параллельно. При этом имеется несколько моделей, которые отличаются сложностью и удобством в использовании. Самая удобная модель - четырёхпараметрическая модель Бюргера (табл. 6).

Знания о температурно-зависимых механических характеристиках материалов имеют особое значение, так как с повышением температуры понижаются прочность и жесткость полимеров, а их ползучесть возрастает. Поэтому при выборе концепции сопоставления данных должны быть приняты во внимание диаграммы растяжения (для оценки пластичности материала) и зависимость жесткости и упругости материала от температуры [2]. Зависимость вязкоупругих свойств от температуры достаточно хорошо выражается в виде фактора потери $t_{an} \delta$ (табл. 4, 5). Представленные реологические модели свидетельствуют о том, что чем выше фактор потери, тем больше термопластический материал по своим свойствам приближается к жидкости с ньютоновской характеристикой текучести.

Кроме того, оценка кривых упругости материала даёт возможность определить характеристические температуры, в том числе температуру перехода в стеклообразное состояние T_g и предельную температуру T_{max} . Особенно отчетливо это видно на кривой полипропилен-сополимер (табл. 7). У этого гетерофазного сополимера, в котором относительно длинные цепи полиэтилена связаны с молекулами полипропилена, встречается фракционированная кристаллизация, что проявляется в двух пиках температуры T_g . Компаундирование по-разному синхронизированных друг с другом полипропиленов позволяет в обширной области целенаправленно регулировать их свойства.

Краткая характеристика механических свойств изотактического гомополимера

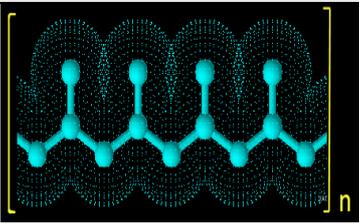
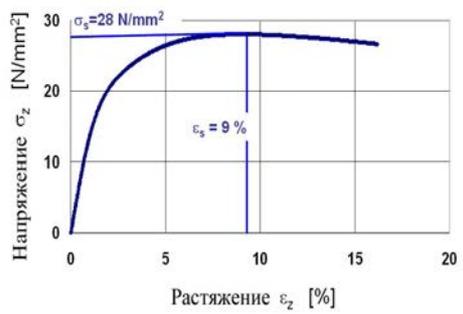
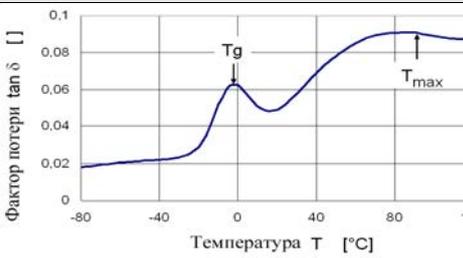
Структура (изотактический ПП)		Описание и свойства																	
		<p>Полипропилен-гомополимеризат может иметь в макромолекуле как изотактическое (частично-кристаллическая структура: 70-80%), так и синдиотактическое или атактическое расположение боковой группы метила. Синдиотактический и атактический полипропилен менее жесткий, низкокristаллический, прозрачнее, более вязкий и ударопрочный.</p>																	
Диаграмма растяжения		Свойства материала																	
		<table border="1"> <tr> <td>Плотность</td> <td>ρ</td> <td>0,9 г/см³</td> </tr> <tr> <td>Модуль упругости (тяга)</td> <td>E_Z</td> <td>1540 Н/мм²</td> </tr> <tr> <td>Напряжение растяжения</td> <td>σ_S</td> <td>28 Н/мм²</td> </tr> <tr> <td>Температура перехода в стеклообразное состояние</td> <td>T_g</td> <td>-5...-10°C</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Предельная температура</td> <td rowspan="2">T_{max}</td> <td>кратковр. 140°C</td> </tr> <tr> <td>долговр. 100 °C</td> </tr> </table>		Плотность	ρ	0,9 г/см ³	Модуль упругости (тяга)	E_Z	1540 Н/мм ²	Напряжение растяжения	σ_S	28 Н/мм ²	Температура перехода в стеклообразное состояние	T_g	-5...-10°C	Предельная температура	T_{max}	кратковр. 140°C	долговр. 100 °C
Плотность	ρ	0,9 г/см ³																	
Модуль упругости (тяга)	E_Z	1540 Н/мм ²																	
Напряжение растяжения	σ_S	28 Н/мм ²																	
Температура перехода в стеклообразное состояние	T_g	-5...-10°C																	
Предельная температура	T_{max}	кратковр. 140°C																	
		долговр. 100 °C																	
Модуль потери $t_{an} \delta$		Зависимость модуля упругости от температуры																	
		<p>Зависимость жесткости от температуры проходит в области $T = -15^\circ\text{C} \dots 90^\circ\text{C}$ почти линейно, которую можно описать подобранной функцией:</p> $E[T] = 0,24 \cdot T^2 + 42 \cdot T + 2227 \quad (7)$ <p>где</p> <ul style="list-style-type: none"> $E[T]$, Н/мм² T, °C 																	
Поведение материалов при длительной статической или квазистатической нагрузке																			
Напряжен ие при растяжен ии σ_z [N/mm ²]	Модуль ползучести E_C [Н/мм ²]		Устойчивость против ползучести C_C []	Отношение для аппроксимации, интерполяции или экстраполяции модуля ползучести $E_C(t)$ (8): $E_C(t) = E_{C(1)} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot (1 - c_C) \cdot \lg \left(\frac{t}{t_1} \right) \right]$															
	$E_{C(1)}$, (1 h)	$E_{C(3)}$, (1000 h)			0,58														
1	955	560																	
2	850	495																	
5	795	460																	

Таблица 5

Краткая характеристика механических свойств (гетерофазного) полипропилен-блок-сополимера

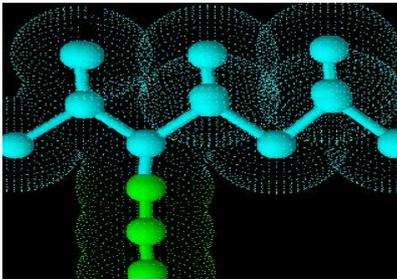
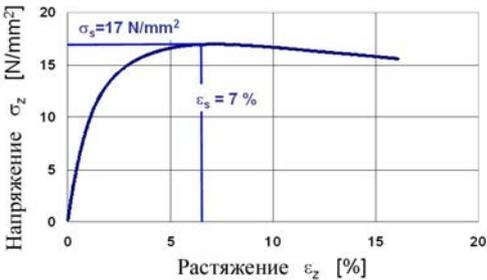
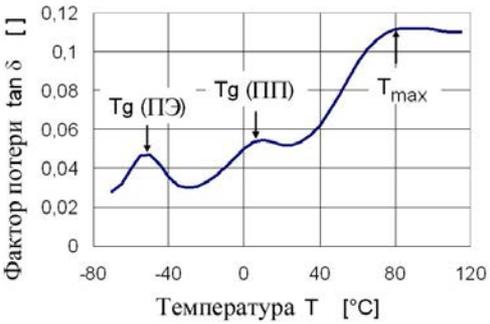
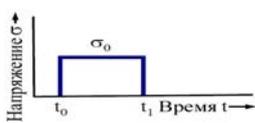
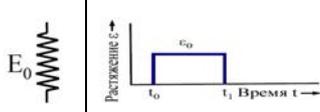
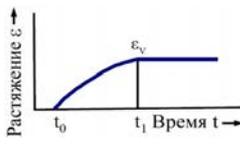
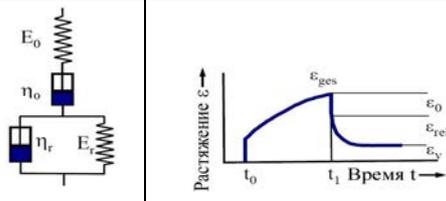
Структура блока ПП-сополимера		Описание и свойства	
		<p>ПП-сополимеры, у которых в процессе полимеризации наряду с пропиеном подвергается реакции также этилен, делятся на материалы, у которых в цепях пропилен в равномерном порядке расположен этилен (блок-сополимеры) и Random-сополимер, у которых блоки этилена распределены статистически. РР-сополимеры выявляют по сравнению с гомополимерами большую вязкость и гибкость, при отчётливо пониженной жесткости и твердости.</p>	
Диаграмма растяжения		Свойства материала	
		<p>Плотность ρ 0,9 г/см³</p> <p>Модуль упругости (тяга) E_Z 1240 Н/мм²</p> <p>Напряжение растяжения σ_S 17 Н/мм²</p> <p>Температура перехода в стеклообразное состояние T_g -5...-10 °С</p> <p>Предельная температура T_{max} кратковр. 100 °С долговр. 80 °С</p>	
Модуль потери $\tan \delta$		Зависимый от температуры модуль упругости	
		<p>Отношение для аппроксимации, интерполяции или экстраполяции модуля ползучести $E_C(t)$ (9):</p> $E[T] = 0,1 \cdot T^2 + 24,3 \cdot T + 1628$ <p>где:</p> <ul style="list-style-type: none"> • $E[T]$ в Н/мм² • T в °С 	
Долговременное поведение при статической или квазистатической нагрузке			
Напряжен ие при растяже- нии σ_Z [N/mm ²]	Модуль ползучести E_C [N/mm ²]		Устойчивость против ползу- чести C_C []
	$E_{C(1)}$, (1 h)	$E_{C(3)}$, (1000 h)	
1	760	450	0,59
2	680	400	
5	640	370	
		Отношение для аппроксимации, интерполяции или экстраполяции модуля ползучести $E_C(t)$ (10):	
		$E_C(t) = E_{C(1)} \cdot \left[1 - \frac{1}{3} \cdot (1 - c_C) \cdot \lg \left(\frac{t}{t_1} \right) \right]$	

Таблица 6

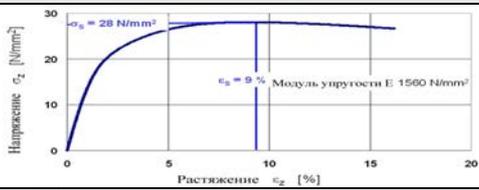
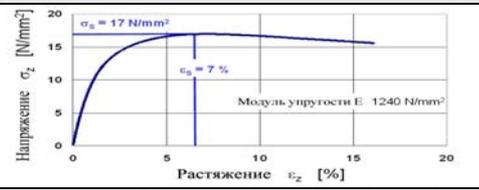
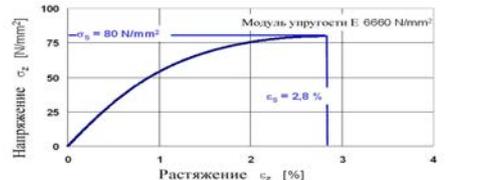
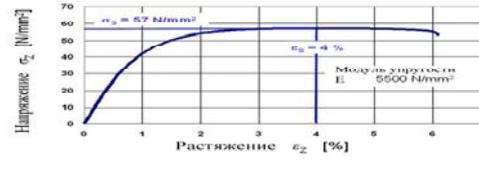
Реологические модели описания вязкоупругого поведения материала

Нагрузка		
Статическая длительная нагрузка		Деформация при $\sigma = \sigma_0 = \text{константные}$
Основной реологический элемент		
Упругий элемент (чисто эластичный, спонтанно-обратимый)		$\epsilon_0 = \frac{\sigma_0}{E_0}$ (2)
Демпферный элемент (абсолютно вязкий, необратимый во времени)		$\epsilon_v(t) = \frac{t \cdot \sigma_0}{\eta_0}$ (3)
Модель четырех параметров (модель Бюргера)		
Модель Бюргера (вязкоупругая)		$\epsilon_{ges}(t) = \epsilon_0 + \epsilon_v(t) + \epsilon_{rel}(t)$ (4) где: $\epsilon_{rel}(t) = \frac{\sigma_0}{E_r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$ (5) $i: \tau = \frac{\eta_r}{E_r}$ (6)

Влияние стекловолоконного армирования на механические свойства ПП. Внедрение коротких стекловолокон в матрицы ПП приводит к существенному повышению жесткости (примерно в 4 раза) и твердости (в 3 раза) материала, что вызывает значительное снижение вязкости (примерно в 4 раза). Такое поведение хорошо наблюдается при сравнении диаграмм растяжения (табл. 7).

Таблица 7

Сравнение диаграмм растяжения армированного коротким волокном полипропилена с неукрепленными типами (испытание на растяжение согласно DIN EN ISO 527)

Тип	ПП-гомопропилент	ПП-сополимер
Не модифицированный		
30% Короткого стекловолокна		

Механические свойства полипропилена после его армирования волокнами из Е-стекла существенно улучшаются, что наглядно демонстрирует рис. 2.

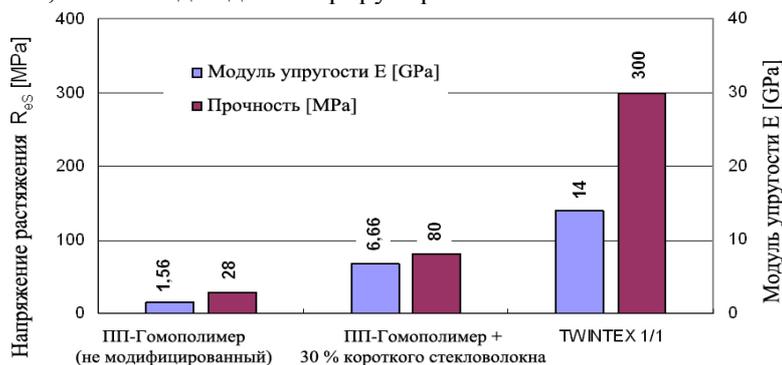


Рис. 2. Сравнение механических свойств армированных бесконечно длинными волокнами ПП (TWINTEX®) с неармированными или армированными короткими волокнами гомополимеров

Примечание: коммерческий полуфабрикат (TWINTEX®), из которого были изготовлены образцы для экспериментов, основан на армировании тканью (полотняное плетение), причем направление нагрузки лежит в плоскости под 0° или 90°. Масса волокон стекла составляет 60%, из которых что 50% ориентированы по оси действия нагрузки.

Определение трибологических характеристик: методики и аппаратура для проведения трибологических исследований. Совершенствование трибологически-оптимизированных лёгких структур, которые отличаются, к примеру, простотой обслуживания и высоким уровнем функциональной интеграции компонентов, является обязательным этапом развития машиностроительного направления по созданию легких трибосистем. Для этого используются согласованные методики испытаний и специальная аппаратура, к которым специализированные учреждения трибологической направленности предъявляют высокие требования, а именно высокая степень воспроизводимости результатов испытаний на трение и износ в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации.

В институте лёгкого машиностроения (ILK) Дрезденского технического университета спроектирован и создан мультифункциональный испытательный стенд, имеющий модульную конструкцию, высокую эксплуатационную надёжность и возможность модернизации [3, 4]. Такой конструктивный принцип позволяет проводить испытания, как нормированных образцов, например, согласно немецкому промышленному стандарту DIN ISO 7148, так и в условиях, близких к реальным аналогичным узлам трения. Модульная конструкция испытательного стенда позволяет путем незначительной модернизации производить его дооборудование высоко-чувствительными измерительными метрологическими системами, а также интегрировать специальное контрольное измерительное оборудование. Например, в табл. 8, представлена модель радиального подшипника скольжения с линейным контактом типа "колодка-кольцо".

Основные параметры процесса трения в ходе испытаний (температура и момент сил трения) контролируются во время испытаний, а распределение износа по дорожке трения измеряется после них. Для оценки распределения износа, как правило, используют современные различные оптические системы. В стандартных методах трибологических испытаний (модельные испытательные системы согласно ISO 7148 немецкого промышленного стандарта) для автоматического анализа износа применяется разработанное в институте лёгкого строения (ILK) специальное устройство и программное обеспечение [5, 6]. В табл. 9, приведены внешний вид измерительной системы $\mu Scan$ и результаты измерений до и после испытаний. 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.

Таблица 8

Модель трибологической испытательной системы "колодка-кольцо" по немецкому промышленному стандарту G176-03 ASTM или ISO 7148-2

<p>Схематическое изображение:</p>	<p>Испытательный узел (общий вид):</p>
<p>Схема модельной трибосистемы скольжения</p>	<p>Образцы модельной трибосистемы скольжения</p>
<p>Описание: В представленном концепте к равномерно вращающемуся кольцу прижимается неподвижная колодка, что имитирует трибологические процессы в радиальных подшипниках скольжения.</p>	

Таблица 9

Оценка износа с помощью оптической системы *μScan*

<p>Оптическая оценка износа с помощью системы <i>μScan</i> (модельная трибосистема "колодка-кольцо")</p>	
<p>Измерительное оборудование</p>	<p>Профиль дорожки трения на колодке (схематическое изображение)</p>
<p>Измерение контрольного тела перед испытанием.</p>	<p>Измерение контрольного тела после испытания</p>

Трибологические характеристики: предварительные исследования. Как показано выше, полипропилен является стандартной пластмассой, которая имеет неудовлетворительные

трибологические свойства, низкую температурную устойчивость и, таким образом, не может использоваться в трибосистемах скольжения, предназначенных для безремонтной эксплуатации, например, в радиальных подшипниках скольжения. Возможность применения ПП в чистом виде ограничивается еще и возникающими при трении высокими контактными температурами. Поэтому для последующих исследований процессов трения и изнашивания на первом этапе определялся уровень нагрузки путем ее повышения до величины, при которой температура образца достигала 50°C. В табл. 10, показана взаимосвязь измеренных нормальной нагрузки и средней приповерхностной температуры колодки, изготовленной из немодифицированного ПП-гомополимеризата, что и определило условия для дальнейших сравнительных испытаний.

Таблица 10

Определение условий для проведения сравнительных испытаний

<i>Диаграмма сила трения - температура</i>	<i>Контрольный режим трения</i>
<p>PP-гомополимеризат, $v = 0,10 \text{ m/s}$</p> <p>Нормальная мощность F_N [N]</p> <p>Температура T [°C]</p> <p>Время t [h]</p> <p>— Сила F_N — Температура T</p>	<p>Образец, моделирующий вал (кольцо): Сталь 100Ст6, HRC 59 ± 1, $R_a = 0,2...0,3 \mu\text{m}$</p> <p>Условия испытаний: скорость скольжения: $v = 0,13 \text{ m/s}$ нормальная сила: $F_N = 100 \text{ Н}$ условия: технически чистые</p>

Коротковолокноное армирование. Большинство технических пластмасс, аналогично полиамиду или полиацетату, после их армирования короткими стекловолокнами приобретают не только улучшенные механические свойства (жесткость, прочность и др.), но также приводит к существенному улучшению их трибологических свойств. В частности, существенно повышается их износостойкость при скольжении по ним закаленной и полированной стали. Таким образом, имеются все основания армировать стандартную пластмассу из полипропилена короткими стекловолокнами с целью повышения ресурса их работы в трибоузлах. Были рассмотрены типы полипропилена, армированные короткими стекловолокнами, описанные выше, на предмет исследования их трибологических свойств. Из представленных в табл. 11 графиков коэффициентов трения в зависимости от пути скольжения отчетливо видно изменение фрикционных свойств во времени: неармированные типы после приработки имеют относительно высокий коэффициент трения $\mu > 0,5$, тогда как коэффициент трения в армированных стекловолокном образцах снижается до $\mu \sim 0,23$.

Фрикционные свойства ПП-гомополимеризата и сополимеров в результате армирования значительно отличаются, а величина износа при сравнении имеет абсолютно противоположные тенденции. У ПП-сополимера, более износостойкого в не модифицированной форме, чем у гомополимера, армирование вызывает отчетливое увеличение износа, тогда как у гомополимера оно уменьшается (табл.12).

Армирование бесконечно длинными стекловолокнами. Для установления влияния ориентации бесконечных стекловолокон, которыми армируется полипропилен, на его трибологические свойства на первом этапе исследовались образцы с односторонне направленными волокнами. Нагрузка при этом создавалась как в направлении армирующих волокон (0°), и перпендикулярно к ним (90°). На следующем этапе изучались образцы, полученные путем армирования полипропилена коммерческим пластинчатым полуфабрикатом марки TWINTEX®. Ориентация плетения из стекловолокна под углами 0° , 90° и $\pm 45^\circ$ относительно направления скольжения влияет на трибологические свойства такого материала, о чем свидетельствуют результаты трибологических испытаний, представленные в табл. 13.

Таблица 11

Сравнительная оценка коэффициента трения

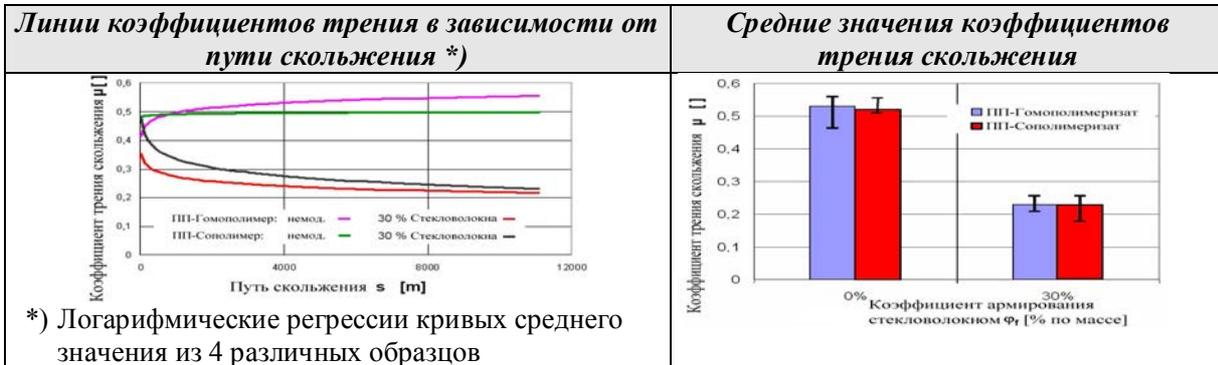
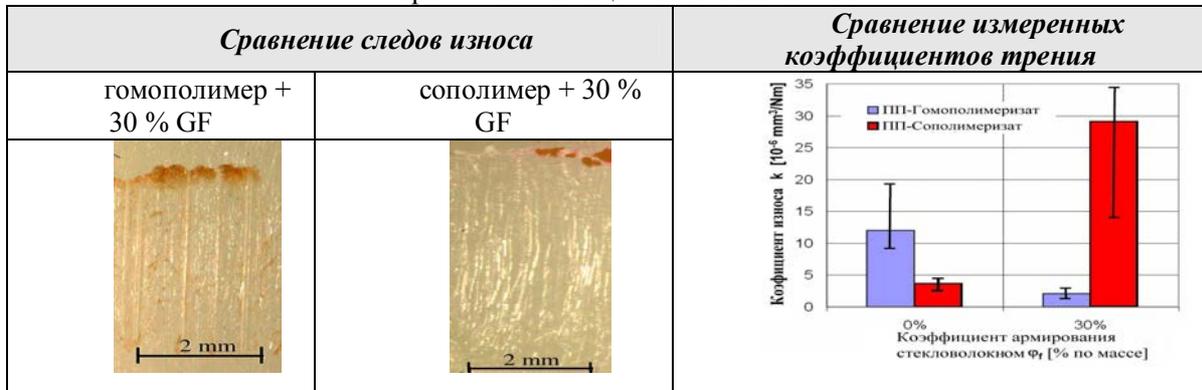


Таблица 12

Сравнительная оценка износостойкости



Представленные в табл. 13, результаты исследований волокнисто-армированных ПП-композиатов свидетельствуют о высокой эффективности армирования таких композиатов. Диаграммы таблицы указывают на существенное снижение коэффициента трения и износа при армировании бесконечными стекловолокнами. При этом наблюдаются некоторые различия в структуре стекловолокон в процессе трения и их изнашивания, что свидетельствует о существенном влиянии направления волокон относительно вектора скольжения на механизм изнашивания. Интересен тот факт, что в композиатах с односторонне направленными волокнами при скольжении перпендикулярно к ним, износ материала меньше, чем в случае параллельного скольжения. Об этом свидетельствует внешний вид дорожек скольжения со следами адгезионного износа, представленные в табл. 14.

Таблица 13

Сравнение поведения комбинаций ПП при трении и износе в зависимости от ориентации бесконечно длинных стекловолокон

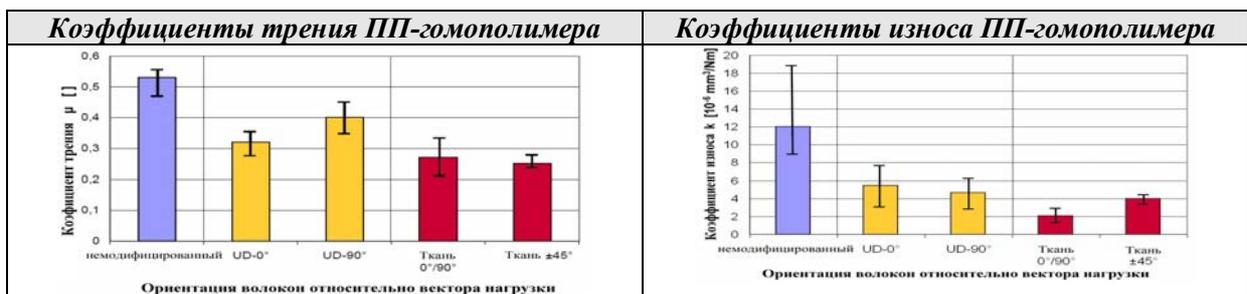
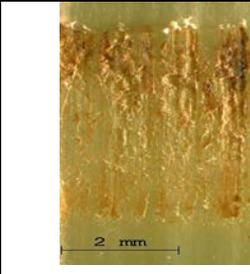
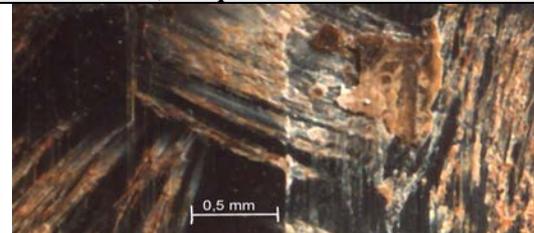
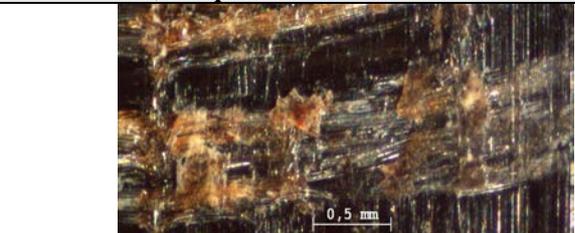


Таблица 14

Сравнение износа поверхностей ПП-композитов в зависимости от ориентации стекловолокон

<i>Поверхность образцов (0°)</i>		<i>Поверхность образцов (90°)</i>	
Перед экспериментом	После эксперимента	Перед экспериментом	После эксперимента
			
<i>TWINTEX®, направление волокон ±45°</i>		<i>TWINTEX®, направление волокон 0°/90°</i>	
			

При прочих равных условиях трения (табл. 14) количество повреждений, вызванных повышением контактной температуры, если направление волокон и скорости скольжения совпадают и угол между ними равен 0°, значительно больше, чем в случае скольжения перпендикулярно (90°) к направлению волокон. Это объясняется возникновением температурных вспышек, так называемых „Hot Spots“, в трибологическом контакте со стекловолокнами. При таких повышенных локальных температурах матричный материал плавится, хотя средняя интегральная температура образца существенно ниже температуры плавления (50°C). Локальный расплав термопласта происходит в области выхода вала из контакта и играет роль смазки, чем объясняется понижение коэффициента трения и температуры. Далее, при вращении вала этот материал затвердевает, затем при входе в контакт реализует трение скольжения с ПП-композитом, подрезается, нагревается и т.д. Такая последовательность процессов рассматривается в рамках температурного механизма изнашивания пластмасс. Поврежденный материал постепенно выносится из контактной области в виде свободных частиц износа и скапливается преимущественно на входе вала в контакт.

Анализ поверхностей износа коммерческого полипропилена (TWINTEX®), армированного стекловолокном, подтверждает правомерность температурных механизмов изнашивания пластмасс (табл. 14, нижняя часть), где наблюдаются участки оплавления матричного материала.

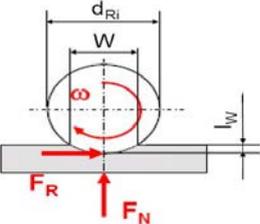
Испытательно-измерительный аналитический комплекс НАУ-01. Для более глубокого изучения триботехнических свойств полимерных материалов перед их использования в качестве материала деталей трибосистем, например подшипников скольжения, необходимо применять как можно более широкий спектр испытательно-измерительного оборудования и методик лабораторных триботехнических испытаний.

Кроме описанных выше аппаратуры и методик испытаний ИЛК (Дрезден, Германия) триботехнические испытания также проводились на испытательно-измерительном комплексе, разработанном в научно-исследовательской лаборатории нанотриботехнологий Национального авиационного университета (Киев, Украина), состоящий из трибологической испытательной системы АСК-01, лазерного дифференциально-фазового сканирующего микроскопа-профилометра ЛДФСМП, многоступенчатых методик испытаний и растрового электронного микроскопа РЭМ-106И.

Машина трения АСК-01 (табл. 15) отличается от известных тем, что линейный контакт, образованный модельным валом (ролик диаметром 30 мм и толщиной 3 мм) с неподвижным плоским образцом имеет три дополнительных степени свободы относительно центра масс ролика.

Таблица 15

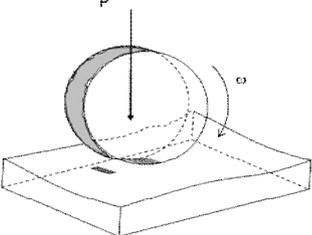
Схемы линейного контакта

Кинематическая схема модельного подшипника скольжения	Внешний вид образцов, реализующих линейный контакт на АСК-01
	

Конструкция машины трения обеспечивает постоянную мгновенную протяженность контакта и равномерное распределение контактных напряжений при трении. Кроме этого, при эволюции трибосистемы во время измерения силы трения за счет перемещения упругого чувствительного элемента (тензодатчик) ось нагружения и сам контакт соответственно смещаются также относительно центра масс ролика. Это позволило существенно снизить погрешность испытаний при определении силы трения и износа (5...10%).

Таблица 16

Схема контакта и внешний вид испытательной системы АСК-01

Схема модельного подшипника скольжения с полным мгновенным контактом	Внешний вид испытательной системы АСК-01
	

Управление режимами трения (нагрузка и скорость) и контроль параметров (сила трения, температура, текущая скорость и нагрузка, радиальные осевые отклонения и пр.) осуществляется посредством разработанного специального электронного блока, внешний вид плат АЦП и ЦАП которых представлен в табл. 17.

Таблица 17

Платы блока управления



Собственное программное обеспечение включает в себя модуль с панелью инструментов управления и контроля параметров испытаний и модуль банка данных, куда заносятся все параметры экспериментов, в том числе исходные данные о поверхностях, 3D-профилограмма износа и изменение химического состава поверхностей трения (табл. 18).

Таблица 18

Оболочка программного обеспечения системы АСК-01 и банка данных



Многоступенчатые методики триботехнических испытаний включают в себя несколько этапов: первые кратковременные этапы трения предназначены для формирования на рабочей поверхности модельного вала вторичных структур, характерных данным условиям (материал образца или смазочная среда), после чего таким образом сформированные вторичные структуры испытываются в течение более длительного времени. Количество этапов и их длительность определяются экспериментально под поставленную задачу. Такие методики наиболее полно отражают триботехнические свойства либо материала, либо смазочной среды, либо того и другого, учитывая фактор времени или длительности эксплуатации.

В разработанной установке к равномерно вращающемуся контрообразцу прижимается плоский образец. Конструкция узла крепления контрообразца и вала обеспечивает постоянную протяженность контакта и исключается его сдвиг от упругости чувствительного элемента, чем достигается высокая повторяемость, как начальных условий, так и результатов испытаний. Разработанная многоступенчатая методика позволяет подбирать оптимальные условия испытаний, обеспечивающие существенное сокращения времени на их проведение при сохранении высокой точности проводимых

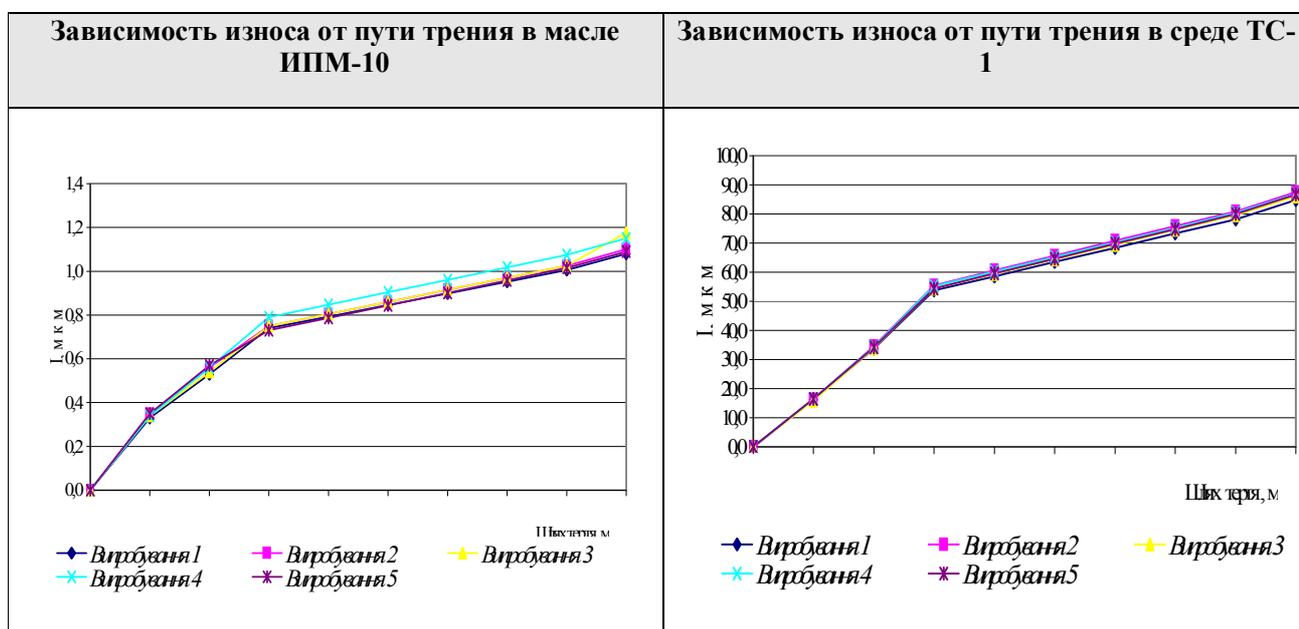
исследований. Имеющееся программное обеспечение дает возможность с высокой точностью фиксировать получаемые экспериментальные данные и, основываясь на них создавать базы данных испытываемых горюче-смазочных и конструкционных материалов

На вышеуказанном оборудовании в результате проведенных серии лабораторных экспериментов по оценке трибологических свойств масла ИПМ-10 и авиационного керосина ТС-1 показано, что погрешность при определении интенсивности изнашивания по многоступенчатой методике (табл. 19) не превышает 5%.

Лазерный дифференциально-фазовый сканирующий микроскоп-профилометр ЛДФСМП разработан совместно с учеными Киевского национального университета им. Тараса Шевченка. Этот новый уникальный микроскоп-профилометр позволяет контролировать исходную шероховатость поверхностей трения перед испытанием с чувствительностью по профилю 1 нм.

Таблица 19

Результаты лабораторных исследований, проведенных на испытательно-измерительном комплексе НАУ-01



При этом, что очень существенно, сканирование производится бесконтактно и без механического перемещения оптического модуля или образца. В результате измерений участок сканируемой поверхности с полем зрения 3x3 мм может быть представлен в виде 3D-изображения, состоящего из 512x512 профилограмм. ЛДФСМП позволяет измерять величину износа после испытаний с точностью до 100 нм³. Полученные данные сохраняются в удобном виде и вносятся в банк данных.

Разработанный бесконтактный дифференциально-фазовый лазерный сканирующий микроскоп ЛСМ (табл. 20) отличается такими эксплуатационными характеристиками, как высокая чувствительность по глубине (до 1 нм), практически полная виброзащищенность, высокое быстродействие при сканировании поверхности, возможность сканирования лазером по линии или по площади, возможность бокового осмотра внутренних поверхностей полых полостей (не менее 10 мм), возможность получать современное компьютерное оцифрованное трехмерное изображение сканируемой поверхности, возможность исследования дефектов поверхностей, например износ от трения, хранение результатов сканирования в удобном для пользователя формате с возможностью их обработки в любое время.

Исследования химического состава на поверхностях трения после испытаний относительно базового материала проводятся на растровом электронном микроскопе РЕМ-106И (фирма Selmi, Сумы, Украина), (табл.21).

Растровый электронный микроскоп РЭМ-106И с системой рентгеновского энерго-дисперсионного анализатора ЭДАР позволяет получить изображение как во вторичных, так и в отраженных электронах с увеличением от 15 до 300000 крат как в режиме низкого, так и высокого вакуума, что дает возможность исследовать образцы как органической, так и неорганической природы. Разрешающая способность прибора в режиме высокого вакуума составляет 4 нм, в режиме низкого вакуума – 6 нм. Наличие блока ЭДАР позволяет снимать спектры химического состава с поверхности. Чувствительность прибора позволяет анализировать химический состав образцов начиная от бора до актиноидов.

Таблица 20

Лазерный дифференциально-фазовый сканирующий микроскоп-профилометр ЛДФСМП

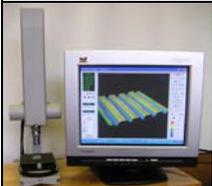
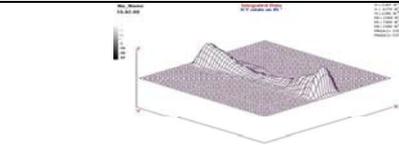
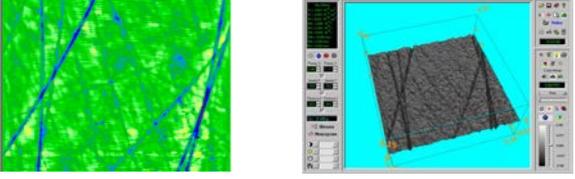
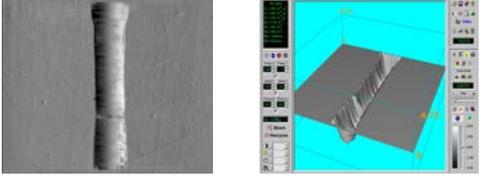
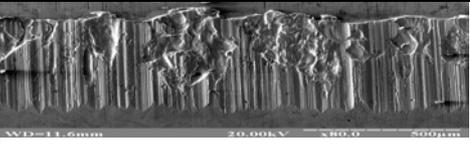
Оптическая оценка износа с помощью лазерного дифференциально-фазового сканирующего микроскопа	
Микроскоп-профилометр	След трения (для наглядности данные инвертированы)
	
<p>Исходная поверхность (двухмерное и трехмерное изображение)</p> 	<p>След трения (двухмерное и трехмерное изображение)</p> 

Таблица 21

Растровый электронный микроскоп. Основные эксплуатационные параметры

Исследования поверхностей на растровом электронном микроскопе-анализаторе РЭМ-106И	
Внешний вид прибора	Изображение поверхности трения
	
Спектр, снятый с поверхности дорожки трения	
	

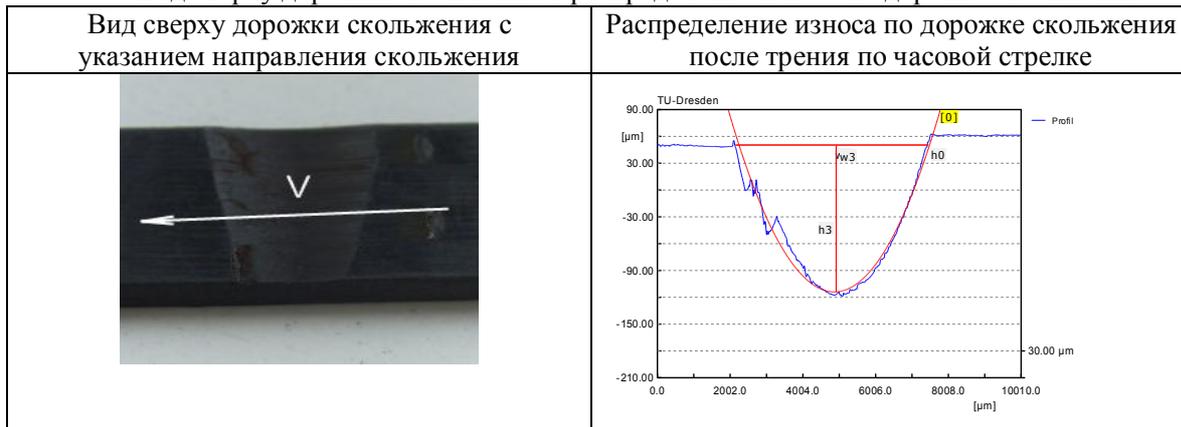
Все полученные результаты измерений на ЛДФСМП и РЕМ-106И вносятся в банк данных материалов или масел (табл. 18), который сохраняется в библиотеке.

Обращают на себя внимание две экспериментально выявленные закономерности, как при испытаниях на оборудовании ПЛК, так и на оборудовании НАУ:

- образование узлов схватывания и вырывания материала происходит преимущественно в области выхода вала из контакта, о чем свидетельствует распределение износа (табл. 20);
- продукты изнашивания выносятся из контакта и скапливаются преимущественно в области входа вала в контакт, о чем свидетельствует наличие небольшого количества свободных частиц износа.

Таблица 22

Вид сверху дорожки скольжения и распределение износа по дорожке скольжения



На профилограммах при трении, как в среде смазочных материалов, так и в среде атмосферного воздуха, как стальных материалов, так и стального вала по полипропилену, области выхода вала из контакта образуются узлы адгезионного разрушения поверхности в виде вырывания материала. Как известно [7,8] в этой области происходит разряжение граничных слоев воздуха. При этом в области входа наблюдается подъем материала над базовой плоскостью, это вызвано пластической деформацией рабочей поверхности и (или) её наклепом продуктами адгезионного взаимодействия вала и образца, или действием обратного вторичного течения сжатого воздуха во входной области контакта. Эти процессы объясняются компрессионно-вакуумной гипотезой природы трения и износа в условиях граничной смазки.

Описание методики испытаний. Общий характер и основные тенденции результатов полученных на оборудовании Дрезденского Технического университета подтверждены на оборудовании лаборатории нанотриботехнологий НАУ (Украина).

Выше представлена профилограмма модельного подшипника скольжения. В области выхода вала из контакта образуются узлы адгезионного разрушения поверхности в виде вырывания материала. Как известно в этой области происходит разряжение граничных слоев воздуха. При этом в области входа наблюдается подъем материала над базовой плоскостью, это вызвано пластической деформацией рабочей поверхности и (или) её наклепом продуктами адгезионного взаимодействия вала и образца, или действием обратного вторичного течения сжатого воздуха во входной области контакта. Эти процессы объясняются компрессионно-вакуумной гипотезой трения и износа в условиях граничной смазки (Стельмах А. У. НАУ).

Выводы

1. Полипропилен - относительно недорогая стандартная пластмасса с неудовлетворительными трибологическими свойствами, может использоваться для изготовления деталей узлов трения, если ее модифицировать, например, путем армирования стекловолокном. В ПЛК Дрезденского технического университета разработан ряд конструкторско-технологических приемов по армированию полипропилена. В рамках представленной работы, для сравнения с другими модификациями полипропилена, использовался так называемый органический лист - комбинированный материал на основе полуфабриката TWINTEX®.

2. Лабораторные триботехнические испытания, проведенные на оборудовании ІЛК ДТУ (Германия) и НАУ (Украина), показали перспективность такого рода модификации полипропилена для их использования в узлах трения, что до сих пор могли реализовывать лишь дорогостоящие конструктивные полимерные материалы типа полиамида или полиацетилена.

3. Результаты триботехнических испытаний показали, что ПП-гомополимеры, армированные текстильными стекловолокнами определенным образом – один из наиболее эффективных способов повышения их износостойкости и уменьшения трения. Подобным образом модифицированные полипропилены уже сегодня встречаются на рынке, что свидетельствует о высоком спросе современного машиностроения на лёгкие и дешевые трибосистемы.

4. В ходе исследований было доказано, что, наряду с улучшением характеристик прочности и жёсткости, армирование стекловолокном положительно влияет также и на трибологические свойства. В частности, существенно повышается износостойкость при условии, что сопрягаемая деталь пары трения изготовлена из закалённой и полированной стали. Характеристики трения и износа этих комбинированных материалов пока хуже, чем у классических полимерных антифрикционных материалов, из чего и следует необходимость дальнейших исследований и разработок.

5. Аналогичные результаты триботехнических испытаний ПП были получены и на испытательно-измерительном аналитическом комплексе НАУ-01 в научно-исследовательской лаборатории нанотриботехнологий Национального авиационного университета.

6. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при трении в среде воздуха могут протекать такие же процессы, как и в среде смазочных материалов, а именно компрессия граничных слоёв в конфузурных областях контакта и их вакуумирование - в диффузорных и возникновением в них соответствующих вторичных течений. Поэтому весьма перспективным является использование компрессионно-вакуумной гипотезы трения при разработке и создании новых лёгких полимерных трибосистем.

7. Результаты предварительных исследований динамики граничных слоёв воздуха в трибоконтакте подшипников скольжения открывают ряд новых конструкторско-технологических направлений для повышения эффективности лёгких армированных определённым образом полипропиленовых поверхностей трения.

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

6. HUFENBACH, W.; KUNZE, K.: Tribologische Kenngrößen in kurzer Zeit ermitteln, *Industrieanzeiger* 38 (1998), S. 60-61

7. Стельмах А.У. Компрессионно-вакуумный механизм адгезионного трения и изнашивания. – 28с. – Деп. в ГНТБ Украины 07.07.2008, №109-Ук2008.

8. Стельмах А.У. Возникновение контактных струйных течений в условиях граничной смазки и механизм их образования. – 43с.- Деп. В ГНТБ Украины 14.04.2009, №20 – Ук2009.