

УДК 620.1:678.026

Е.В. Алифанов¹, А.М. Чайкун¹, Д.С. Горлов¹, М.А. Венедиктова¹

КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ АЛКИДНЫХ ПОКРЫТИЙ С АБРАЗИВНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ В СУХОМ СОСТОЯНИИ И В ВОДЕ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-88-95

Представлены результаты исследования трибологических свойств модельных систем несскользящих покрытий, где в качестве полимерной основы взято однокомпонентное алкидно-уретановое связующее, а в качестве абразивного наполнителя применялся песок и электрокорунд различного фракционного состава. Приводятся значения коэффициента трения указанных модельных систем как в условиях сухого трения, так и при трении со смазкой, а также в контакте с водой. Представленные данные могут быть использованы при разработке несскользящих покрытий, которые активно применяются как в авиационной промышленности, так и в других сферах народного хозяйства. Важность оценки трибологических характеристик систем в присутствии воды определяется тем, что наибольшую опасность для персонала при эксплуатации различных объектов представляют собой мокрые поверхности как после дождя, так и после разлива различных жидкостей, среди которых водные растворы и суспензии являются наиболее распространенными. В работе предпринята попытка объяснить полученные результаты с точки зрения современных трибологических теорий.

Ключевые слова: полимеры, несскользящее покрытие, трибология, коэффициент трения, полиуретан, наполнители.

E.V. Alifanov¹, A.M. Chaykun¹, D.S. Gorlov¹, M.A. Venediktova¹

FRICITION COEFFICIENT OF THE ALKYD COVERINGS WITH ABRASIVE FILLERS IN DRY CONDITION AND IN WATER

In article results of research of tribological properties of model systems of nonskid coatings based on one-component alkyd binding filled with a sand and an electrocorundum of different fractional structure. In work values of friction coefficient of the specified model systems, as are given in dry condition, and «drowned» in water. Submitted data can be used when developing nonskid coatings which are actively applied, both in the aviation industry, and in other spheres of national economy. Importance of assessment of tribological characteristics of systems in presence of water is defined by that the greatest danger to the personnel at operation of different objects is represented by wet surfaces, both after rain, and after spill of different liquids among which aqueous solutions and suspensions are the most widespread. In work attempt to explain the received results from the point of view of modern tribological theories is made.

Keywords: polymers, nonskid coating, tribology, friction coefficient, polyurethane, fillers.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Фактор трения деталей и узлов машин и механизмов во многом определяет стабильность работы и долговечность сложнагруженных систем, которые применяются

в авиации и космонавтике [1–5]. В промышленности особое внимание уделяется вопросам эксплуатации поверхностей с повышенным коэффициентом трения в присутствии смазки. Так, на объектах, на которых предусмотрено применение нескользящего покрытия для обеспечения безопасности персонала (летательные аппараты, судовые палубы, строительные объекты и т. п.), наиболее опасные ситуации происходят при намокании рабочих поверхностей во время дождя, проливов жидкостей или масел. Наличие низкомолекулярных соединений в зоне контакта трущихся тел в значительной мере изменяет физику их взаимодействия. В случае если одно из тел пары трения является полимером, закономерности еще более усложняются [6, 7].

Одним из самых актуальных вопросов в данной области является проблема обеспечения высокой степени сцепления с дорогой автомобильных шин. Разработчики шин прилагают значительные усилия для увеличения данного эксплуатационного параметра: постоянно совершенствуется состав протекторных резин, создаются оптимальные рисунки протектора для эффективного водоотведения из зоны контакта шины с мокрой дорогой. Отдельное внимание также уделяется качеству дорожного покрытия. В некоторых ответственных случаях поверхность подвергается специальной обработке. Например, нанесение поперечных канавок на дорожное покрытие является эффективным средством удаления избытка воды с поверхности, при этом с точки зрения дренажной способности они более эффективны, чем продольные канавки такой же формы. Это объясняется тем, что максимальный градиент выдавливания воды из катящейся шины имеет то же направление, что и поперечные канавки покрытия.

Считается [8], что поскольку на свойства полимера существенное влияние оказывает смазка, то различие в поведении полимера и металла сводится к различию в поглощении смазки. Размягчение поверхности полимера может привести к увеличению коэффициента трения скольжения.

В присутствии смазки сухое трение, которое типично для взаимодействия твердых тел, заменяется на граничное. Это происходит, когда в зоне контакта дополнительно присутствуют небольшие участки низкомолекулярных веществ. При увеличении количества смазки наблюдается жидкостное или вязкое трение, также различается смешанный тип, когда имеет место как сухое, так и жидкостное трение [9].

При рассмотрении трения металлов в присутствии смазки отмечалось, что сопротивление сдвигу для пленки смазки значительно ниже, чем для полимеров. В условиях применения смазки, близкой по природе к полимеру (различные типы масел, смолы, олигомеры и т. п.), слой пленки состоит из длинноцепных молекул, которые мало отличаются от молекул полимерной подложки. Следовательно, если даже поверхностный слой полимера сильно адсорбирует смазку, то его прочность при сдвиге (и, следовательно, коэффициент трения скольжения) не может сильно отличаться от прочности при сдвиге самого полимера [10].

Однако для бытовых случаев, когда речь идет об обеспечении безопасности людей на промышленных объектах, в роли смазки в большинстве случаев выступает вода. Мокрые лестницы, капоты вертолетов, трапы, элементы фюзеляжа, на которые осуществляется доступ обслуживающего персонала, – все это потенциально опасные объекты. Вода является прекрасной смазкой для большинства эластомеров, из которых производится основная масса подошвенных материалов. В условиях, когда задача обеспечения безопасной работы сотрудников является приоритетной, применение нескользящих покрытий является полностью обоснованной.

В данной статье представлены основные результаты исследования влияния дисперсности и содержания абразивного наполнителя на коэффициент трения в воде модельных систем на основе алкидного связующего.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 15.2. «Эластомерные и уплотнительные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Материалы и методы

Объекты исследования – модельные системы на основе связующего на базе алкидно-уретанового лака (ТУ2311-273-05800142–2006) с функциональными добавками, где в качестве абразивных наполнителей применялись песок (ГОСТ 9428–73) и электрокорунд (ГОСТ 28818–90) различного фракционного состава. В качестве седативной добавки в данной работе применяли стеклянные микросферы (ТУ6-48–91).

Модельные системы изготавливали на лабораторной мешалке путем смешения в течение 10 мин алкидно-уретанового связующего с абразивным наполнителем. Покрытия наносили на подложку из алюминиевого сплава Д16 при помощи кисти, образцы до трибологических испытаний после нанесения покрытий выдерживали на воздухе в течение 72 ч.

Определение коэффициента трения проводили на трибометре CETR UMT-3MT (приборы данного типа активно используются для определения коэффициента трения эластомеров [11–13]) с использованием привода R33HE350 для возвратно-поступательного движения при температуре 20°С, согласно СТО 1-595-2-507–2016:

Время, с	30
Контртело	Палец из полиуретана
Диаметр пальчика, мм	13
Длина цилиндра, мм	13
Пластинки	Образцы из алюминиевого сплава Д16 с модельными покрытиями
Нагрузка, Н	10
Частота колебаний, Гц	0,5
Амплитуда колебаний, мм	15

Испытания проводили при температуре окружающего воздуха 23±3°С на образцах без использования смазок – трение в сухом состоянии при относительной влажности воздуха 50±10%, а также на образцах в контакте с водой. Выбранный режим имитировал потенциально возможное проскальзывание обуви с полиуретановой подошвой по сухому нескользящему покрытию, а также по покрытию со сплошной водной пленкой, моделирующей состояние поверхности после дождя или пролива водной суспензии.

Результаты и обсуждение

Данные исследования коэффициента трения экспериментальных композиций, где в качестве абразивного наполнителя использовался песок фракции <750 мкм, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициент трения экспериментальных композиций, наполненных песком фракции <750 мкм

Содержание песка, % (по массе)	Коэффициент трения	
	сухого покрытия	при испытании в воде
10	0,4500	0,4700
20	0,7500	0,5900
30	0,6600	0,5100

Отметим, что увеличение содержания данного типа наполнителя не приводит к увеличению коэффициента трения экспериментальных систем. Поверхность покрытия характеризуется ярко выраженной неоднородностью, связанной со сложностью равномерного распределения частиц абразивного наполнителя по поверхности при нанесении кистью. В процессе проведения эксперимента наблюдалось выкрашивание крупных частиц абразивного наполнителя из полимерной матрицы. Необходимо также отметить снижение коэффициента трения при испытаниях в воде по сравнению с сухим состоянием покрытия.

Данные исследования коэффициента трения экспериментальных композиций, где в качестве абразивного наполнителя использовался песок фракции <250 мкм, представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Коэффициент трения экспериментальных систем,
наполненных песком фракции <250 мкм**

Содержание песка, % (по массе)	Коэффициент трения	
	сухого покрытия	при испытании в воде
10	0,5576	0,4819
20	0,6511	0,5535
30	0,6021	0,6689

Проанализировав представленные в табл. 2 данные, можно отметить, что использование в качестве абразивного наполнителя песка меньшей фракции приводит к получению более равномерного покрытия при нанесении кистью, однако его нельзя охарактеризовать как полностью однородное. В процессе проведения эксперимента также наблюдалось выкрашивание наиболее крупных частиц абразивного наполнителя из полимерной матрицы. Полученные данные показывают некоторое снижение коэффициента трения при испытаниях в воде по сравнению с сухим состоянием, однако при содержании песка в количестве 30 мас. ч., наоборот, виден его рост.

Использование загустителей различных типов в производстве покрытий позволяет улучшить технологические свойства и однородность получаемых материалов. Считается, что загустители замедляют осаждение крупных частиц, что является крайне важным технологическим параметром. В качестве загустителя в данной работе использовали стеклянные микросферы. Имеются данные, согласно которым микросферы также способствуют приданию материалам нескользких свойств [14].

Данные исследования коэффициента трения экспериментальных композиций, где в качестве абразивного наполнителя использовался песок фракции <250 мкм с добавлением 2,5% микросфер, представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Коэффициент трения экспериментальных систем,
наполненных песком фракции <250 мкм с добавлением 2,5% стеклянных микросфер**

Содержание песка, % (по массе)	Коэффициент трения	
	сухого покрытия	при испытании в воде
10	0,6438	0,6505
20	0,6332	0,6567
30	0,5671	0,5521

Отмечено улучшение диспергирования частиц песка при применении стеклянных микросфер. Однородность нанесенной пленки улучшилась, однако при определении

коэффициента трения явление выкашивания крупных частиц полностью устранено не было. Представленные в табл. 3 данные показывают, что для всех исследованных систем со стеклянными микросферами не наблюдается существенного падения коэффициента трения при испытаниях в воде по сравнению с сухим состоянием – данный параметр практически не изменяется.

В данной работе проводилось исследование возможности применения в качестве абразивного наполнителя для нескользящих покрытий электрокорунда, который выгодно отличается от песка тем, что его можно приобрести определенного фракционного состава, причем размер частиц внутри одной фракции более однороден по сравнению с просеянным песком. Поэтому представляется крайне важным, что саму технологическую операцию просеивания можно исключить из технологического процесса нанесения покрытия.

Данные исследования коэффициента трения экспериментальных композиций, где в качестве абразивного наполнителя использовался электрокорунд в количестве 40 мас. ч. различного фракционного состава, представлены в табл. 4

Таблица 4

Коэффициент трения экспериментальных систем, наполненных 40 мас. ч. электрокорунда различных фракций

Фракция электрокорунда	Коэффициент трения	
	сухого покрытия	при испытании в воде
F60	0,6351	0,6911
F70	0,5580	0,5551
F100	0,5882	0,7036
F120	0,5861	0,6109
F180	0,5560	0,7038

Согласно полученным в табл. 4 результатам, значительное количество исследованных модельных систем показало, что экспериментальные значения коэффициентов трения в присутствии воды выше, чем в сухом состоянии. Такие показатели являются положительными с точки зрения эксплуатационных характеристик нескользящего покрытия, однако их трудно объяснить с точки зрения теории трения, так как вода является смазкой для любых эластомерных материалов, к которым можно отнести и полиуретан, используемый в данной работе в качестве контртела. Однако следует отметить, что примеры увеличения коэффициентов трения полимеров в присутствии смазки описаны в научно-технической литературе [15]. Так, подобные явления наблюдались для нейлона в системах, где в качестве смазок использовались такие вещества, как вода, этиленгликоль или фторированное смазочное масло.

Общая сила трения, в случае если одно из тел пары трения эластомер, будет определяться четырьмя составляющими: адгезионной (зависящей от молекулярного взаимодействия в зоне контакта), деформационной (зависящей от гистерезисных потерь), когезионной (учитывающей влияние износа) и вязкостной (учитывающей торможение, вызванное наличием смазки). Коэффициент трения скольжения сферы или цилиндра по эластомерному основанию под нагрузкой может быть представлен в виде двух основных компонент: адгезионной и гистерезисной. Считается, что обобщенный коэффициент трения является функцией отношения давления к модулю. С увеличением скорости скольжения это отношение практически не изменяется.

Оно действует для скоростей в диапазоне от нуля до некоторого критического значения. Это зависит от природы пары трения и условий испытаний. За критическим значением скорости обобщенный коэффициент трения быстро уменьшается до величины, определяемой вязким сдвигом в пленке смазки и измененными гистерезисными потерями [16]. Это объясняется тем, что при малых скоростях скольжения продолжительность выдавливания смазки из зоны контакта меньше, чем продолжительность перемещения на дистанцию, равную диаметру контактной зоны, т. е. при этих скоростях, по сути, наблюдается сухое трение. Экспериментальные данные, представленные в данной работе, соответствуют именно этому типу скольжения, что и объясняет отсутствие значительного падения значения коэффициента трения для модельных систем с абразивным наполнителем в присутствии воды по сравнению с испытаниями в сухом состоянии.

При повышении линейной скорости полностью сухой контакт не сохраняется в связи с недостатком времени на выдавливание смазки, и коэффициент трения быстро падает. Отмечено, что если на сферу или цилиндр нанести микрошероховатости, то это приводит как к увеличению коэффициента трения при малых скоростях, так и к росту критической скорости. Это соответствует теории сжатых пленок, согласно которой продолжительность выдавливания смазки значительно снижается, если одна или обе поверхности имеют шероховатость.

Данные по коэффициенту трения в сухом состоянии и в воде для алюминиевого сплава Д16 без покрытия и с нанесенным алкидным связующим без добавления абразивного наполнителя представлены в табл. 5.

Таблица 5

**Коэффициенты трения алюминиевого сплава Д16
без покрытия и с нанесенным алкидным связующим**

Контртело	Коэффициент трения	
	сухого покрытия	при испытании в воде
Алюминиевый сплав Д16	0,4315	0,2124
Алкидное связующее без абразивного наполнителя	0,5314	0,3268
Модельное покрытие с электрокорундом фракции F120	0,5861	0,6109

Из представленных в табл. 5 данных видно, что для гладких поверхностей в присутствии воды наблюдается значительное падение коэффициента трения при испытаниях в воде. Таким образом, эффект смазки проявляется в полной мере. При этом для образца покрытия с абразивным наполнителем не только не происходит падения коэффициента трения, но и наблюдается его некоторый рост.

Текстура поверхности имеет определяющее значение для коэффициента трения в случае, когда хотя бы один из элементов пары трения является эластомером. Так, гладкие (полированные) поверхности могут характеризоваться высоким значением адгезионного трения в сухих условиях и приводить к весьма малым значениям коэффициента трения в условиях смазки или мокрых поверхностей. При малых скоростях скольжения в случае шероховатой поверхности, такой как шлифовальная шкурка, где расстояние между отдельными выступами достаточно большое, чтобы обеспечить дренаж, падения коэффициента трения при наличии смазки не наблюдается. Это объясняется тем, что при малых скоростях острота выступов текстуры поверхности обеспечивает пенетрацию поверхности сжатой пленки смазки так, что при этом обеспечивается хорошая адгезия.

Заключения

Применение абразивных наполнителей, таких как песок или электрокорунд, является эффективным средством повышения коэффициента трения покрытий как в сухом состоянии, так и при испытаниях в воде.

Модельные системы с крупнодисперсными абразивными наполнителями характеризуются высокой неоднородностью. В процессе определения коэффициента трения наблюдается выкрашивание частиц наполнителя, причем в первую очередь более крупных.

Уменьшение размера частиц наполнителя приводит к улучшению однородности получаемых покрытий, причем применение таких загустителей, как стеклянные микросферы, оказывает дополнительное положительное влияние. При этом коэффициент трения остается на достаточно высоком уровне.

Значительное количество исследованных в данной работе модельных систем показало, что значения коэффициентов трения в присутствии воды выше, чем в сухом состоянии. Это подтверждает эффективность применения абразивных наполнителей для создания несскользящих покрытий. В их отсутствие (для чистого алюминия и полимерного связующего без наполнителя) наблюдается значительное падение коэффициента трения в присутствии воды, т. е. имеет место типичный эффект смазки.

Трение полимеров, в особенности эластомеров, является сложным процессом, который определяется рядом составляющих: адгезионной, деформационной, когезионной и вязкостной. На коэффициент трения существенное влияние оказывает текстура поверхности контактирующих тел, скорость контакта, температура, средство полимерного материала со смазкой и прочие факторы. В связи с этим разработка обобщенных теоретических закономерностей, описывающих поведения полимеров при трении и учитывающих фактор трения, является крайне трудной задачей [17]. Поэтому при решении конкретных практических задач необходимо планировать проведение эмпирических исследований для учета и оценки вклада данного параметра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // *XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тез. докл. в 5 т.* Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
3. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // *Наука и жизнь*. 2010. №4. С. 2–7.
4. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. С. 346–348.
5. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. №3. С. 2–14.
6. Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Горлов Д.С., Венедиктова М.А. Особенности механизма трения эластомерных материалов различных типов. Теоретические и практические аспекты (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №1 (61). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-8-8.
7. Алифанов Е.В., Чайкун А.М., Горлов Д.С., Венедиктова М.А. Трибологические характеристики алкидных покрытий с абразивными наполнителями различной дисперсности // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2018. №4 (64). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-10-10.

8. Moore D.F. Drainage Criteria for Runway Surface Roughness// The Journal of Royal Aeronautical Society. 1965.Vol. 69. P. 337–342.
9. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка, 1979. 188 с.
10. Bowden F.P., Tabor D. The friction and lubrication of solids. Oxford: Clarendon Press. 1964. Part 2. 424 p.
11. Морозов А.В., Петрова Н.Н. Методика оценки коэффициента трения уплотнительных резин // Трение и износ. 2016. Т. 37. №2. С. 162–167.
12. Морозов А.В. Экспериментальное определение статического и динамического коэффициента трения скольжения эпиламированных материалов // Трение и износ. 2014. Т. 35. №2. С. 114–119.
13. Морозов А.В., Муравьева Т.И., Петрова Н.Н. и др. Исследование трибологических и адгезионных свойств морозостойких резин // Каучук и резина. 2015. №6. С. 22–26.
14. Williamson N., O'Donoghue M., Datta V.J. Overview of Anti-Slip Coatings for Structural Steel // Journal of Protective Coatings & Linings. 2003. P. 41–49. URL: <http://www.paintsquare.com/jpcl/> (дата обращения: 19.06.2018).
15. Мур Д. Трение и смазка эластомеров. М.: Химия, 1977. 262 с.
16. Nough S. Transition to elastohydrodynamic lubrication of rubber // M.S. Thesis. West Virginia University, 1970.
17. Мурашов В.В. Оценка степени накопления микроповреждений структуры ПКМ в деталях и конструкциях неразрушающими методами // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 73–81. DOI: 10.18577 /2071-9140-2016-0-3-73-81.