

УДК 678.8

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

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА ТРЕНИЯ
ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ.
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-1-8-8

Обзор посвящен анализу механизма трения эластомерных материалов. Изделия из них массово применяются в качестве комплектующих в изделиях авиационной техники. Проанализированы теоретические и практические аспекты трения и износа полимерных материалов, в том числе и эластомеров. Показаны особенности применения смазки и ее влияния на характер трения и износ эластомеров. Приведены особенности механизма трения эластомерных материалов различных классов. Показаны современные разработки ФГУП «ВИАМ» в области нескользких полимерных покрытий для авиационного применения. Выделены основные компоненты рецептуры подобных покрытий, определяющие их технические и технологические характеристики.

Ключевые слова: эластомер, трибология, трение, коэффициент трения, износостойкость резин, гистерезис, автомобильные шины, нескользкое покрытие.

E.V. Alifanov¹, A.M. Chaikun¹, D.S. Gorlov¹, M.A. Venediktova¹

**FEATURES OF THE MECHANISM OF FRICTION
OF ELASTOMERIC MATERIALS OF DIFFERENT TYPES.
THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS (review)**

The overview is devoted to the analysis of the mechanism of friction of elastomeric materials. Products from them are in large quantities applied as accessories in products of aviation engineering. Theoretical and practical aspects of friction and wear of polymeric materials including elastomer features of application of lubricant and its influence on character of friction and wear of elastomer Are shown are analyzed. Features of the mechanism of friction of elastomeric materials of different classes are given. Modern development of VIAM Federal State Unitary Enterprise in the field of nonskid polymer coatings for aviation application is shown. Are noted their basic components and defined their technical characteristics.

Keywords: rubber, tribology, friction, coefficient friction, the rubber wear-resistance, hysteresis, automobile tires, nonslip coating.

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

В процессе эксплуатации деталей из эластомерных материалов они подвергаются комплексному воздействию различных факторов. Износостойкость резин характеризует их способность сопротивляться потере материала в результате разрушения поверхности под действием сил различной природы (например, фрикционных или антифрикционных). Различают следующие виды износа резин: абразивный, усталостный, износ посредством скатывания, макроскопический, пиролитический [1, 2]. Это во многом определяет долговечность и работоспособность деталей и изделий из резин.

В настоящее время значительно возрастает интенсивность эксплуатации авиационной техники, активно разрабатываются новые специальные авиационные материалы с улучшенными техническими характеристиками. Резинотехнические детали и изделия активно используются в авиации в качестве уплотнительных материалов различных типов, авиационных шин и т. д. Поэтому теоретические знания о трении и износе резин позволяют оптимально и целенаправленно использовать изделия из них с учетом конкретных особенностей условий эксплуатации. Это дает возможность расширить диапазон работоспособности авиационной техники с учетом современных требований и задач [1, 3–7]. Поэтому изучение механизма работы специальных материалов, обладающих особым комплексом свойств, необходимо для расширения использования в авиации полимеров, в том числе и эластомеров.

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

Актуальность проблемы

Сила трения – это сила, возникающая при соприкосновении двух тел и препятствующая их относительному движению. Благодаря ей объекты остаются в статическом состоянии, если на них не действует какая-либо сила, обеспечивается необходимая опора для их передвижения относительно друг друга, перемещение имеет конечную величину в случае соприкосновения двух тел и т. д. В случае полимерных материалов имеет место внутреннее межмолекулярное трение, которое влияет как на процесс переработки материалов (саморазогрев при смешении на вальцах или резиносмесителе, каландровании), так и на эксплуатацию изделий из них (гистерезисные потери, механо-деструкция и т. п.) [2–8].

Понимание механизма взаимодействий, которые возникают при контакте эластомерных материалов с твердой поверхностью или между собой, крайне важно для материалововеда или конструктора. Это позволяет описать такие важные процессы, как качение и скольжение автомобильных покрышек на мокрой и сухой дороге, оценить и оптимизировать текстуру дорожных покрытий, в том числе взлетно-посадочных полос аэродромов, создавать обувные подошвенные резины, обеспечивающие комфорт и безопасность передвижения в различных погодных условиях.

Следует учитывать фактор трения при оценке работоспособности эластомерных деталей в условиях существенного растяжения [10]. При наличии эластомерного компонента (каучука) в рецептурах ПКМ фактор трения влияет на трещиностойкость, а также определяет характер и степень накопления повреждений [11, 12].

Важно учитывать трение при подборе уплотняющих материалов, применяемых в подвижных соединениях, это позволяет снижать потери мощности механизмов, правильно подбирать смазки.

Интенсивностью трения определяется такой важнейший параметр, как износ, который часто определяет срок службы изделия.

Одним из прикладных применений знаний о трибологических характеристиках полимерных материалов является создание противоскользящих покрытий. Так, для качественного обслуживания авиационной техники требуется удобство и безопасность перемещения персонала по внешней поверхности летательных аппаратов. В связи с этим ступеньки, поручни, площадки и другие рабочие поверхности летательных аппаратов необходимо покрывать специальными противоскользящими материалами. Покрытия со специальными требованиями по уменьшенному скольжению применяются также в других областях промышленности. Увеличенный коэффициент трения является важнейшей характеристикой палубных покрытий. Нескользящие покрытия применяются в производственных помещениях и строительстве.

Общие характеристики трения (основные зависимости, исторический экскурс)

Трение или фрикционное взаимодействие изучает раздел физики, называемый механикой фрикционного взаимодействия или трибологией. Считается, что одним из основоположников данной науки является знаменитый Леонардо да Винчи и именно его труды положили начало более детальному изучению данного явления. Первое математическое описание законов трения принадлежит Кулону, который определил, что сила трения скольжения прямо пропорциональна нормальной силе, действующей на тело, при этом коэффициентом пропорциональности является коэффициент трения – основная характеристика пары трения, зависящая от природы контактирующих материалов и качества поверхности [13].

В физике различают три основных вида трения: трение скольжения, трение покоя и трение качения. Кроме того, по характеру взаимодействия контактирующих поверхностей различаются: сухое трение, когда между взаимодействующими телами нет дополнительных слоев (смазок); граничное, когда в зоне контакта присутствуют участки различной природы (оксидные пленки, жидкости и т. п.); жидкостное или вязкое, когда в зоне контакта присутствует разделительный слой из твердой смазки, жидкости или газа; смешанное, когда имеет место как сухое, так и жидкостное трение [14].

Для пар трения, в которых одним их контактирующий тел является эластомер, характерно эластогидродинамическое или вязкоупругое трение.

Особенности трения эластомеров по сравнению с трением твердых тел

Следует отметить, что исследование эффектов поверхностного трения проводилось в основном для твердых тел. Показано [9], что в этом случае имеют место два сочетающихся процесса: упругого (адгезионного) контакта и пластичного (деформационного) царапания (так называемое пропахивание) более мягкого материала более твердым. Преобладание того или иного процесса определяется природой контактирующих материалов, шероховатостью поверхности и нормальным давлением.

В случае если одним из контактирующих тел является эластомер, обладающий способностью к эластической деформации, добавляется дополнительный (гистерезисный) компонент, вносящий вклад в процессы взаимодействия поверхностей трущихся тел. При скольжении эластомера по твердой поверхности отдельные молекулярные цепи поверхностного слоя взаимодействуют с молекулами подложки, образуя локальные связи. Во время скольжения происходит растяжение этих связей, их разрыв и последующая релаксация, далее образуются аналогичные связи в новых зонах контакта и процесс повторяется. За счет этого явления происходит дополнительная диссипация энергии (адгезионное рассеивание) и сила трения растет. При этом адгезионная составляющая взаимодействия – это четко выраженное поверхностное свойство, в то время как гистерезисная составляющая зависит от вязкоупругих свойств эластомера. Разработка указанной теории проведена Балджиным с сотрудниками [15]. Согласно их предположениям локальные силы адгезии препятствуют скольжению и в материале возникают упругие деформации, которые приводят к накоплению энергии в элементах, находящихся в адгезионной связи с контртелом. Когда упругие силы превышают силы адгезии, происходит разрыв адгезионных связей и элементы сокращаются (рефлексируют). Таким образом, макромолекулы поверхностных слоев эластомера испытывают постоянное воздействие ускоряющих и тормозящих сил различной амплитуды, а разность между этими силами и есть сила торможения скольжения, соответствующая силе трения. Исследователями также установлено, что коэффициент адгезионного трения прямо пропорционален тангенсу угла механических потерь эластомера и обратно пропорционален его твердости.

Исследования показали [9], что адгезионная и гистерезисная составляющие силы трения резин изменяются в зависимости от температуры и скорости воздействия, аналогично характеру изменения вязкоупругих свойств резин. Установлено также, что при определенной температуре увеличение скорости скольжения приводит к изменению силы трения, характеризующейся кривой с двумя максимумами: адгезионным – в области низких скоростей и гистерезисным – в области крайне высоких скоростей. При этом повышение температуры воздействия сдвигает максимумы в сторону больших скоростей скольжения.

Применение смазки в эластомерах

Одним из главных способов воздействия на силу трения в определенных контактных парах является применение смазок. Жидкая пленка, введенная между двумя движущимися шероховатыми телами, оказывает смазывающее действие, которое значительно снижает коэффициент трения, при высоких скоростях может наблюдаться жидкостное трение [16].

При взаимодействии эластомера и поверхностью с нанесенной смазкой происходит уменьшение областей контакта между макромолекулами полимера и контртелом в зоне трения, что приводит к снижению адгезионной составляющей трения и, как следствие, уменьшению гистерезисной составляющей и трения в целом.

Из работы [17] по изучению трения резиноподобных материалов в условиях смазки можно сделать выводы о том, что: во-первых, коэффициент трения скольжения уменьшается с увеличением контактного давления, причем с уменьшением шероховатости поверхности происходит более резкое его падение; а во-вторых, важным фактором является, какое из взаимодействующих тел имеет большую шероховатость – резина или подложка.

Когда поверхность эластомера покрыта смазкой с избытком, то для обеспечения высокого коэффициента трения необходимо использовать контртела, характеризующиеся значительным дренажным эффектом [18], т. е. способностью выдавливать жидкость из зоны контакта. Для характеристики текстуры поверхности предложены дренажные числа. Кроме того, экспериментально показано, что уменьшение коэффициента трения скольжения при нанесении смазки зависит от характеристик поверхности: ее гидрофобности или гидрофильности. Так, сродство поверхности к смазке облегчает ее смазывание и, следовательно, приводит к увеличению эффективности применения смазки.

Однако при подборе смазки важно учитывать то, что она может поглощаться полимером. Размягчение поверхностных слоев полимера при длительном воздействии смазки может приводить к увеличению трения скольжения. Кроме того, адсорбция смазки на поверхность полимера приводит к образованию тонкого слоя, физические свойства которого значительно отличаются от свойств смазки в массе эластомера. Поскольку вязкость характеризует свойства смазки в массе, то для описания характеристик поверхностного слоя используется термин – смазывающее действие («маслянистость»). Установлено [9], что смазывающее действие зависит не только от вязкости смазки, но и от реологических свойств соприкасающихся поверхностей скольжения.

Особым классом материалов, применяемых для снижения трения, являются твердые смазки. Они представляют собой продукты, которые обеспечивают смазывающий эффект между двумя взаимодействующими движущимися поверхностями в условиях сухого трения. К наиболее известным представителям данного класса можно отнести графит и дисульфиды молибдена или вольфрама, также в их число входят фторопласты. Твердые смазки стабильны при высоких температурах и в химических агрессивных средах. Они имеют небольшую молекулярную массу, не требуют дополнительного уплотнения и не нуждаются в системе нагнетания и циркуляции при применении.

Однако необходимо учитывать, что коэффициенты трения в случае твердой смазки обычно выше, чем в случае жидкой смазки. Их использование приводит к некоторому дополнительному местному локальному износу трущихся поверхностей. Часто твердые смазки используют в комбинации с жидкостями и маслами, а также для их нанесения на поверхность металлов используют высоконаполненные пленки на основе органических связующих.

Практическое применение закономерностей трения эластомеров

Как указывалось ранее, трение оказывает существенное влияние на эксплуатацию машин и механизмов. Одним из ярких примеров пары трения с участием эластомерного материала являются подвижные уплотнения валов. Наиболее распространенные виды таких уплотнений – это кольцевые уплотнения и манжеты [19]. В данных узлах в основном реализуется режим граничной и полужидкостной смазки. Причем первый режим характерен при повышенных нагрузках (высоких давлениях сред) на уплотнение и низких скоростях скольжения [20]. В таких условиях сила трения зависит от материала контртела, состава поверхностно-активных компонентов рабочей жидкости, шероховатости поверхности и состава резины. Понижение температуры до определенного уровня вызывает повышение коэффициента трения, однако при достижении температуры стеклования резины сила трения резко уменьшается, что объясняется уменьшением площади фактического контакта вследствие увеличения модуля упругости при снижении температуры. При дальнейшем понижении температуры трение почти не меняется.

Частичное раскрытие стыка и проникновение смазочного материала в зону контакта может наблюдаться, когда напряжения в уплотнительном узле не очень велики. В данном случае имеет место гранично-жидкостной или жидкостной характер трения. Коэффициент трения в таком случае определяется в основном гидродинамическими характеристиками жидкости. При подборе уплотнения необходимо также учитывать диффузию смазки в полимер и, как следствие, изменение свойств эластомера.

Трение при качении шин

Если для уплотнения подвижных соединений стараются по возможности уменьшать потери на трение во избежание неэффективных потерь мощности аппаратов, то существуют системы, в которых целенаправленно стремятся к увеличению коэффициента трения. Так, при разработке рецептуры и конструкции автомобильных шин коэффициент сцепления с дорогой является важнейшей эксплуатационной характеристикой. От него зависит как способность автомобиля к движению, так и величина тормозного пути.

Коэффициент сцепления шины с дорогой может варьироваться в пределах от 0,05 до 1, при этом требования по безопасности в зависимости от условий движения обеспечиваются при его значении не менее 0,4–0,6 [21]. Факторы, влияющие на величину и характер сцепления колеса с дорогой, можно условно разделить на внешние и внутренние по отношению к шине. К внутренним факторам можно отнести материалы, используемые в конструкции, особенно важна рецептура протекторных резин. Важным также является рисунок протектора, позволяющий обеспечивать быстрое выдавливание влаги (которая в данном случае является смазкой, значительно снижающей коэффициент трения) из пятна контакта и избежать эффекта так называемого «аквапланирования». Этот эффект является типичным примером перехода шин при контакте с дорожным покрытием к жидкостному режиму трения. Кроме того, к внутренним факторам можно отнести равномерность давления в покрышках автомобиля.

К основным внешним факторам можно отнести погодные условия. Так, коэффициент сцепления на влажном асфальте уменьшается в среднем до 1,5 раза, еще большее снижение вызывает образование на дорожном покрытии снежной или ледяной пленки. Следует также отметить, что слой грязи и пыли на сухой дороге может выступать в роли сухой смазки, способной значительно снижать силу сцепления колеса с дорогой.

Нескользящие покрытия

Для обеспечения безопасной работы персонала на различных объектах народного хозяйства необходимо обеспечивать комфортное передвижение людей по рабочим поверхностям. Одним из распространенных способов предотвращения скольжения является применение специальных изделий (пластин, ковриков, лент) с развитой поверхностью, которые крепятся различным образом на объект и обеспечивают необходимый уровень противоскользких свойств. Для этих целей также применяется специальная обувь. Одним из наиболее распространенных способов придания поверхности дополнительных нескользящих свойств является применение нескользящих покрытий.

Часто в качестве нескользящего покрытия применяют материалы, использующиеся в качестве антикоррозионных защитных покрытий и дополнительно содержащие различные наполнители, которые придают композициям стойкость к абразивным воздействиям. Данные материалы имеют высокую адгезию к защищаемой поверхности, хорошие показатели по стойкости к внешним разрушающим воздействиям. При этом вопросам равномерного распределения частиц абразивного наполнителя, размер которых, как правило, значительно превышает размер других ингредиентов, обычно уделяется недостаточное внимание. Это приводит к сокращению срока службы покрытия в связи с выделением («выкрашиванием») из него крупных частиц наполнителя.

В качестве полимерной основы нескользящих покрытий применяются в основном двухкомпонентные системы на основе полиуретанов, полиакрилатов или эпоксидных смол с различными функциональными добавками. Это позволяет получать покрытия с широким диапазоном заданных свойств. К недостаткам данного типа материалов можно отнести относительную сложность нанесения и низкую ремонтпригодность.

Применение для этих целей алкидных и алкидно-уретановых систем позволяет значительно упростить процесс нанесения нескользящих покрытий, поскольку такие покрытия можно наносить с помощью валика и кисти. Кроме того, в РФ выпускается широкий спектр материалов данного типа. Это также позволит существенно снизить стоимость производимой продукции.

Важным аспектом разработки рецептур покрытий данного типа является подбор наполнителя. Осмысленный подход к природе и размеру частиц выбранного наполнителя позволит не только значительно улучшить функциональность нескользящего покрытия, но и увеличить срок его эксплуатации.

Во ФГУП «ВИАМ» разработано противоскользкое покрытие для авиационной техники марки ВПП-1. Следует отметить, что для его изготовления используется доступное сырье отечественного производства.

Заключения

Таким образом, приведенные в данной обзорной статье закономерности, описывающие механизм трения эластомеров различных классов, позволяют целенаправленно применять детали и изделия из них в таких условиях, которые в максимальной степени позволяют реализовать высокие технические свойства резин. Предложенные в работе подходы по анализу механизмов трения и износа эластомерных материалов различных типов дают возможность увеличить срок службы деталей с учетом сложного, многофакторного воздействия на них в процессе работы, характерного для изделий авиационной техники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Бартенев Г.Н., Лаврентьев В.В. Трение и износ полимеров. М.: Химия, 1984. 224 с.
3. 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.
4. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении // Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3–4.
5. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2–7.
6. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
7. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
8. Шайдаков В.В. Свойства и испытание резин. М.: Химия, 2002. 231 с.
9. Мур Д. Трение и смазка эластомеров. М.: Химия, 1977. 262 с.
10. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Повреждаемость материалов при статическом растяжении // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 91–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-91-94.
11. Крылов В.Д., Яковлев Н.О., Курганова Ю.А., Лашов О.А. Межслоевая трещиностойкость конструкционных полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2016. №1 (40). С. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-79-85.
12. 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.
13. Кошелев Ф.Ф., Корнев А.Е., Буканов А.М. Общая технология резины. М.: Химия, 1978. 527 с.
14. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин. Киев: Наукова думка, 1979. 188 с.
15. Bulgin D., Hubbard G.D., Walters M.H. Road and laboratory studies of friction of elastomers // Rubber technology conference. London, 1962. P. 173–188.
16. Kummer H.W., Meyer W.E. New theory permits better frictional coupling between tire and road // Automobile congress. Munich, 1966. Paper №B11.
17. Denny D.F. The influence of load surface roughness on the friction of rubber-like materials // Proceeding of the Royal Society. 1953. Vol. 66. P. 386.
18. Moore D.F. An elastohydrodynamic theory of tire skidding // Automobile congress FISITA. Barcelona, 1968. Paper No.11.
19. Чайкун А.М., Наумов И.С., Алифанов Е.В. Резиновые уплотнительные материалы (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №1 (49). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.12.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-1-12-12.
20. Машиностроительный гидропривод / под ред. В.Н. Прокофьева. М.: Машиностроение, 1978. 495 с.
21. Евзович В.Е., Райбман П.Г. Автомобильные шины и колеса. Назначение, эксплуатация. 2-е изд. М.: МИРОС, 2012. 160 с.