



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Техническая эксплуатация автомобилей»

Г. А. Самко

**ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Методическое пособие

Часть 2

**Минск
БНТУ
2016**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Техническая эксплуатация автомобилей»

Г. А. Самко

ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Методическое пособие
для студентов специальностей 1-37 01 06
«Техническая эксплуатация автомобилей»
и 1-37 01 07 «Автосервис»

В 3 частях

Часть 2

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2016

УДК 378.147.85(075.8)

ББК 74.58я7

С17

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент *В.А. Лойко*;

канд. техн. наук *С.Б. Соболевский*

Самко, Г. А.

- C17 Основы научных исследований и инновационной деятельности: методическое пособие для студентов специальностей 1-37 01 06 «Техническая эксплуатация автомобилей» и 1-37 01 07 «Автосервис»: в 3 ч. Ч. 2 / Г.А. Самко. – Минск : БНТУ, 2016. – 53 с.
ISBN 978-985-550-598-4 (Ч. 2).

В пособии рассмотрены основные физико-технические направления научных исследований и инноваций с соответствующими им концепциями и теориями с учетом особенностей технической эксплуатации автомобилей и общих закономерностей развития и функционирования транспортной техники. Основное внимание уделено теориям трения, смазки и износа.

Издание предназначено для студентов автотранспортных специальностей и может быть полезно студентам, магистрантам и аспирантам других инженерно-технических специальностей.

Часть 1 (авторы Г. А. Самко, А. С. Сай) вышла в 2014 г.

УДК 378.147.85(075.8)

ББК 74.58я7

ISBN 978-985-550-598-4 (Ч. 2)

ISBN 978-985-550-048-4

© Самко Г. А., 2016

© Белорусский национальный
технический университет, 2016

Введение

Успешная инженерная и инновационная деятельность в области технической эксплуатации транспортных машин с учетом особенностей режимов и условий их работы невозможна без представлений и знаний о происходящих при этом процессах изменения технического состояния машин. Эти процессы описываются и исследуются в таких разделах науки, как трение, смазка, объединенных понятием «трибология» – научная дисциплина, занимающаяся изучением трения и износа узлов машин в присутствии смазочных материалов, деформация, разрушение и восстановление технических объектов, результатом исследования и обобщения которых стало возникновение теории надежности машин. Управление техническим состоянием автотранспортных средств, а также его прогнозирование – важнейшие задачи, которые стоят перед инженерами – специалистами по технической эксплуатации автомобилей. Фундаментом, на котором построены теоретические основы технической эксплуатации транспортных средств, являются теории трения, смазки, износа, деформации, разрушения и восстановления их технического состояния.

В первой части пособия рассмотрены понятие «техническое состояние объекта» и подходы к его моделированию. В данной, второй части аккумулированы и синтезированы теории и концепции, показывающие различные стороны проявления изменений технического состояния объектов, вскрывающие сущность, причины, механизмы и закономерности изменения технического состояния транспортных машин с учетом конструктивных особенностей и условий эксплуатации.

В пособии приводятся специальные направления научных исследований и инновационной деятельности в области трибологии применительно к технической эксплуатации транспортных средств, в частности, методика создания композитных компаундированных масел на основе симплекс-решетчатого планирования.

1. ТЕОРИЯ ТРЕНИЯ

1.1. Общие сведения

При относительном перемещении поверхности одной детали по другой возникает сопротивление движению в виде касательной силы, именуемой силой трения*, всегда действующей в направлении, противоположном направлению движения.

Преодоление сил трения деталями машин обязательно ведет к потерям энергии, избежать которых нельзя, но по возможности следует стремиться уменьшить.

Трение представляет собой сопротивление, возникающее при относительном перемещении двух сопряженных между собой поверхностей, а преодоление силы трения на пути перемещения сопряженных деталей называется **работой трения**.

Если обозначить сопротивление трению F и давление между поверхностями трения P , то сила трения пропорциональна давлению, то есть

$$F = c \cdot P \text{ или } c = F/P,$$

где c – коэффициент трения.

* Исследования в области трения актуальны. Научный и инновационный потенциал, практическая выгода от таких исследований далеко не исчерпаны. Но история развития учения о трении восходит к эпохе Возрождения и связана, прежде всего, с именем великого ученого и художника Леонардо-да-Винчи. Именно ему принадлежит открытие первого закона трения твердых тел, согласно которому сила трения зависит только от веса тел или от полной нагрузки, также второго закона, устанавливающего, что коэффициент трения не зависит от величины трущихся поверхностей.

Известны также работы французов Амонтона и Кулона, открывших закон о трении скольжения твердых тел. Ценны работы Пуаре и Боше по определению коэффициентов трения (1851), а также англичан Галона и Вестингауза, в 1879 г. обосновавших работу трения колес поездов на рельсах. Аналогичные работы в 1900 г. были проведены американским профессором Смарттом относительно автомобильных шин. В XX в. вопросы трения разрабатывались инженерами Клейном и Шветье и др.

Математическая теория трения была создана в семидесятые годы XX в. профессором БНТУ (БПИ) Ф.А. Апейко, с трудами которого можно познакомиться и в библиотеке БНТУ.

Работа сил трения транспортных средств определяется их конст-рукцией и состоянием сопряжений, выполняемой транспортной ра-ботой и во многом зависит от вида трения.

Различают следующие основные виды трения: по характеру смаз-ки трущихся поверхностей: чистое трение, сухое (или внешнее), жид-костное (или внутреннее, называемое также совершенным или гид-родинамическим) и граничное.

Существуют также промежуточные виды трения: полусухое (как среднее между сухим и граничным) и полужидкостное (как среднее между жидкостным и граничным или сухим трением). Практически при работе механизмов транспортных средств могут наблюдаться смешанные, периодически изменяющиеся или промежуточные ви-ды трения.

Процесс трения сопровождается излучением тепла, электризацией, изнашиванием, разрушением поверхностей и другими явлениями.

1.2. Виды трения

Трение – это сопротивление, которое возникает при взаимодей-ствии деталей – в местах их касания при перемещении одной из них или обоих по соприкасающимся поверхностям. Другими словами, трение – это сопротивление относительно перемещению сопри-касающихся тел, возникающее в месте их контакта. В зависимости от характера перемещения соприкасающихся поверхностей разли-чают три основных вида трения: трение скольжения, трение каче-ния и трение верчения.

Трение скольжения распространено в транспортных средствах и их элементах. Оно имеет место между шейками коленчатого вала и коренными и шатунными подшипниками, между шейками распре-делительного вала двигателя и втулками, между стенками цилин-дров и поршневыми кольцами, между стенками цилиндров и юбкой поршня двигателя и т. д.

Трение качения возникает между шариками и опорными коль-цами шарикоподшипников, между роликами и опорными кольцами роликоподшипников, между поверхностью ролика роликового тол-кателя и поверхностью кулачка распределительного вала и т. д.

Трение верчения может проявиться при точечном движении тел в случае их соприкосновения (обычно в одной точке). В этом случае

относительное вращение вокруг оси происходит через точку вращения по нормали к соприкасающимся поверхностям.

На практике один вид трения может сопровождаться другим.

Все рассмотренное выше подразумевает, что целью исследования процессов трения является снижение силы и работы трения в механизмах машин, как неперемное условие повышения их коэффициентов полезного действия (КПД), производительности и эффективности, надежности, в том числе и их долговечности (в идеале создание вечного двигателя). Но особенностью транспортных средств является и то, что в них имеются системы, где сила трения – это благо, результат работы механизма, показатель его мощности и эффективности, и это – тормозные системы.

Как показывают экспериментальные исследования, трение качения часто сопровождается трением скольжения, другими словами, в действительности имеет место так называемое сложное трение (комбинированное), что особенно сильно проявляется при трении зубьев зубчатых колес.

Необходимо отметить также, что теория трения располагает различными подходами и методиками расчета сил и коэффициентов трения в зависимости от вида трения – скольжение или качение.

Исследования в области трения показывают, что основными факторами, влияющими на трение сопряженных деталей, являются:

вид трения (качение, скольжение);

скорость относительного перемещения трущихся поверхностей деталей;

величина и характер давления при трении;

качество и количество смазки;

материал деталей;

способ обработки и чистота поверхностей трения.

Вид трения оказывает большое влияние на процесс износа деталей. Так, при трении скольжения чаще всего возникают износ схватыванием, тепловой и абразивный износ, при трении качения основным является осповидный износ (питтинг), приводящий к особым явлениям усталости металла и вызывающий разрушение поверхности.

Вид трения изменяется в зависимости от толщины смазывающего слоя, так как жидкостное трение может переходить в какое-либо промежуточное или граничное трение, что обуславливает изменение интенсивности износа и вида изнашивания.

Все поверхности в большей или меньшей степени шероховатые, и даже поверхности, хорошо обработанные и отшлифованные, имеют видимые под микроскопом маленькие углубления и возвышенности. Эти маленькие неровности являются причиной сухого (внешнего) трения, когда две несмазанные поверхности, прижатые одна к другой, находятся в движении. Когда поверхности очень гладкие и находятся в тесном контакте, то возникает добавочное сопротивление скольжению, которое зависит от взаимного притяжения молекулами. Эта сила сцепления уже достаточно давно определяется специальными приспособлениями, например шведскими калибрами Джонсона.

Чистое трение – трение при отсутствии на трущихся поверхностях следов посторонних веществ (в механизмах не встречается, может быть получено в вакууме).

Сухое трение возникает тогда, когда трущиеся поверхности непосредственно соприкасаются и взаимодействуют между собой без присутствия смазки. В случае сухого трения металлов сила трения возникает вследствие сопротивления соприкасающихся микронеровностей сопряженных деталей и происходящего при этом молекулярного сцепления. Молекулярное сцепление, а также микросваривание имеют место в контактах неровностей вследствие высокого удельного давления, при котором разрушается окисная пленка, как в случае трения между тормозными накладками и барабанами колес автомобиля. Для сухого трения коэффициент трения находится в пределах $0,1-0,4$.

Большое значение при исследовании процессов трения придается налетам. Поверхности почти никогда не бывают абсолютно чистыми. Химически чистые поверхности быстро притираются и слипаются при трении одна о другую. Кроме того, все поверхности покрыты тем, что имеет название поверхностных пленок, более или менее жирных по своей природе. Эти пленки образуются под воздействием воздуха, влаги, пыли и других загрязнений и могут противодействовать истиранию и предупреждать его, во всяком случае при низких давлениях. Их воздействие имеет много общего с влиянием тонких смазочных пленок.

Вследствие неровностей поверхностей трения происходит их изнашивание, причем более мягкие поверхности стираются более интенсивно, чем твердые. У твердых и гладких поверхностей износ и трение значительно меньше, чем у мягких и шероховатых. Поверхности из тождественных материалов легче слипаются, чем пары тре-

ния из различных материалов. На этом основании во всех случаях трения поверхностей примеряются материалы различной твердости, например: поршневые кольца изготавливаются из более мягкого материала по сравнению с материалом цилиндров двигателя.

Хотя трение между твердыми поверхностями не зависит от величины поверхности соприкосновения, при одном и том же давлении износ будет тем больше, чем меньше площадь соприкосновения, вследствие большего давления на единицу поверхности.

Введением третьего промежуточного вещества между поверхностями трения (графит, тальк, окись свинца и т. д. или смазочной мази или масла) сухое трение может быть ликвидировано частично или полностью или, другими словами, будет преобразовываться в полусухое или жидкостное трение.

Жидкостное трение – это трение при толщине масляного слоя между трущимися поверхностями, превышающей их микронеровности, при этом оно возникает только за счет перемещения молекул в слое масла. Жидкостное трение наблюдается в период установившегося режима работы автомобиля, в таких узлах, как подшипники коленчатого вала и др. Жидкостное, или внутреннее, трение в отличие от сухого (внешнего) происходит из-за относительного перемещения смежных слоев смазки и обусловлено вязкостью материалов. Понятие внутреннего трения целесообразно использовать относительно смазок, которые используются между поверхностями трения для уменьшения силы трения и интенсивности износов.

Сущность всякой смазки заключается в том, что смазка пристает к смазываемым поверхностям и образует между ними пленку, которая в условиях рабочих скоростей, давлений и температур не выжимается и разъединяет поверхности трения. При совершенной системе смазки поверхности трения никогда не прикасаются одна к другой и трение полностью зависит от смазочного материала. Для жидкостного трения коэффициент трения колеблется в пределах от 0,002 до 0,01.

Граничное трение соответствует трению, когда трущиеся детали разграничены только теми слоями молекул масла, которые адсорбированы на поверхностях этих деталей из-за полярной активности и сил молекулярного притяжения. Проявлением такого вида трения является трение в зацеплении шестерен главной передачи заднего моста, шариковых подшипниках, то есть в условиях высоких удельных нагрузок.

Полусухое трение. В условиях малых скоростей и высокого давления невозможно или чрезвычайно затруднительно получить постоянный слой смазки. Именно поэтому поверхности трения находятся в условиях или плохой смазки, или полусухого трения, для которого коэффициент трения имеет величину от 0,01 до 0,10. Его величина меняется в зависимости от того, смазываются ли поверхности очень бедно, незначительно, и тогда действуют законы для несмазывающихся поверхностей, или они смазываются основательно, и тогда приближаются условия, для которых справедливы законы совершенной, жидкостной смазки.

1.3. Теория сухого трения по Б. Н. Костецкому

Особый интерес представляет теория внешнего (сухого) трения профессора Б. Н. Костецкого, согласно которой главным является вопрос об образовании поверхностных связей, которые формируют сопротивление движению. При этом им выделяются четыре типа связей:

1. Механические связи, образующиеся при взаимодействии шероховатостей поверхностей технологического происхождения.

2. Механические связи, возникающие в процессе пластической деформации и образования микронеровностей при трении.

3. Физико-химические связи, имеющие место при пластической деформации и развитии диффузионных явлений в зоне контакта, в виде металлических связей между сопряженными поверхностями.

4. Физические связи, обусловленные силами Ван-дер-Ваальса, которые неизбежно сопутствуют каждому сопряжению твердых тел.

По теории Б. Н. Костецкого, если растет нагрузка, то высота микрорельефа увеличивается до определенной величины насыщенности (кривая 1), а коэффициент диффузии меняется по экспоненциальному закону (кривая 2) (рис. 1.1). Внешнее трение переходит во внутреннее при максимальной нагрузке вследствие усиления диффузионных явлений и деформаций. Адгезионные связи, обусловленные силами Ван-дер-Ваальса, не зависят от нагрузки (прямая линия 3).

Адгезионные связи обусловлены слипанием разнородных твердых или жидких тел при соприкосновении их поверхностей, вызванном силами межмолекулярного взаимодействия.

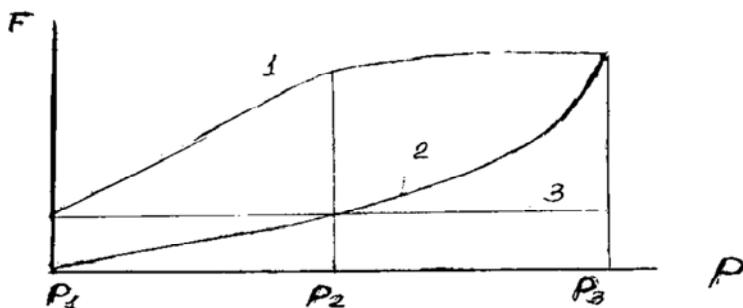


Рис. 1.1. Развитие поверхностных связей F в процессе трения при нагрузке P :
 1 – высота субмикрорельефа; 2 – коэффициент диффузии; 3 – адгезионные связи

Считается, что при самых малых нагрузках доминирующее значение имеют адгезионные связи. При средних нагрузках преобладают связи, обусловленные действием микрорельефа, а при больших – естественные металлические связи, которые образуются в результате диффузионных явлений. Это свидетельствует о том, что необходимо учитывать динамику изменений состояния и свойств материалов поверхностей трения в самом процессе трения. Поверхностный слой в процессе трения на глубине до 10 мкм представляет собой комбинацию зон из адсорбционной пленки, окисленного металла, затем деформированного металла и, наконец, металла первичной структуры.

Главная цель теории внешнего трения – не только обосновать и рассчитать силы и коэффициенты трения, но и обеспечить возможность управления процессами трения.

1.4. Законы трения

Законы сухого трения проявляются в следующем. Сопротивление от трения:

прямо пропорционально давлению между поверхностями трения;

не зависит от скорости движения поверхностей при небольших скоростях;

не зависит от величины поверхностей;

в сильной степени зависит от шероховатости и твердости поверхностей трения.

Эти законы относятся также к движению качения и скольжения, а значит, применимы к шариковым и роликовым подшипникам.

Законы, которым подчиняется **жидкостное трение**, значительно отличаются от законов сухого трения и могут быть сформулированы следующим образом.

Сопrotивление жидкостного трения:

не зависит от давления между поверхностями;

возрастает вместе со скоростью движения поверхностей трения;

возрастает с увеличением поверхности трения;

не зависит от состояния поверхностей трения и их материалов;

целиком зависит от вязкости смазочного материала и рабочей температуры смазочного слоя.

Постоянных законов, которые характеризуют **полусухое трение**, не выявлено. Сопrotивление трения складывается частично из сухого, частично из жидкостного трения, и чем сильнее преобладает сухое трение, тем более важным является свойство масла, которое носит название маслянистости, и тем менее существенной является его вязкость. Смазка таких поверхностей осуществляется подбором наиболее оптимальных пропорций между уменьшением износа и уменьшением жидкостного трения. В условиях малого давления и большой скорости обычно необходимо стремиться к уменьшению наличия жидкостного трения, поэтому для таких случаев подходят масла малой вязкости и большой маслянистости. В случае высоких давлений и малой скорости приходится особенно следить за уменьшением износа, и для этих условий подходят вязкие масла с большой маслянистостью.

Законы трения покоя. Трение покоя особенно существенно для тех транспортных машин, которые ввиду специфики своего назначения и условий эксплуатации используются периодически, сезонно или по мере необходимости, например: военная техника, сельскохозяйственная техника, пожарные машины и т. д.

Значения коэффициентов трения, которые приводились выше, являются кинетическими величинами, так как относятся к поверхностям трения в движении. Когда поверхности некоторое время находятся в покое, то масляный слой более или менее выжимается и возникает некоторое соприкосновение металлических поверхностей между собой. В результате этого усилие приведения в действие механизма значительно больше, чем усилие на получение такого же эффекта во время движения. В действительности статический коэффициент трения (коэффициент трения покоя) обычно приближается

к значениям коэффициента для сухого трения. Этим объясняется повышенная интенсивность износов деталей машин при запуске.

Если скорость поверхностей трения очень мала, то величина кинетического коэффициента трения может быть даже выше статического значения коэффициента. Это происходит потому, что к сухому трению прибавляется сопротивление, обусловленное присутствием смазки, так как скорость процесса трения слишком мала для того, чтобы смазка могла создать какой-либо существенный раздел поверхностей трения.

Если скорость увеличивается и смазка начинает образовывать сплошной слой, то сухое трение быстро уменьшается, уступая позиции жидкостному трению, и кинетический коэффициент трения также уменьшается до тех пор, пока не образуется постоянный слой смазки.

Высокой величиной статического коэффициента трения объясняется большое усилие, необходимое для приведения в движение из состояния покоя двигателя транспортных машин. Это обстоятельство является одним из решающих для обоснования необходимости применения шариковых и роликовых подшипников, потому что для поверхностей качения практически нет отличий между значениями статического и кинетического коэффициентов трения.

Статический коэффициент трения зависит главным образом:

от состояния и твердости поверхностей трения: он ниже для твердых и гладких поверхностей, чем для мягких и шероховатых;

давления между поверхностями: чем больше давление, тем сильнее выдавливается смазка;

продолжительности пребывания поверхностей в состоянии покоя: чем продолжительней был перерыв в работе, тем больше вероятность выжимания смазки;

температуры окружающей среды;

природы смазки.

Твердые смазки наподобие графита не выжимаются от давления, поэтому для подшипников, которые смазываются твердой смазкой, статический и кинематический коэффициенты трения почти одинаковы. Полужидкие смазки не могут выжиматься полностью под воздействием давления поверхностей во время остановок машин, и это дает им значительное преимущество по сравнению с маслами.

Минеральные масла выжимаются почти целиком. В то же время эксперименты показывают, что растительные и животные масла или

компаундированные ими минеральные масла оставляют тонкую пленку между поверхностями, и поэтому статический коэффициент трения для таких масел значительно меньше, чем для чистых минеральных. В результате применения таких масел существенно уменьшаются не только пусковые усилия, но и снижается износ деталей.

Таким образом, сила трения зависит от качества трущихся поверхностей, в том числе от качества обработки поверхностей и применяемых материалов, вида смазки и ее качества, характера сопряжений, условий и режимов работы машин, в том числе от давления, нагрузки, скорости, температуры и времени.

Из рассмотренного выше очевидна взаимосвязь вопросов трения и смазки на теоретическом и практическом уровнях.

2. ТЕОРИЯ СМАЗКИ

2.1. Основные положения

Теория смазки – это теория, которая занимается изучением влияния и установлением зависимостей между способами смазки, видом и качеством смазочного материала и эффективностью работы механизмов и устройств.

В ней рассматриваются влияние смазочных материалов на потерю трения в различных механизмах и агрегатах, на интенсивность износов и ресурс машин и их элементов с учетом условий и особенностей их эксплуатации. Объектом исследований являются также свойства масел, способы их получения и регенерации.

Теория смазки – это политеория, одной из составляющих которой является гидродинамическая теория смазки, имеющая особое значение для транспортных машин.

В теории смазки рассматриваются смазочные материалы в трех агрегатных состояниях: твердом, например графитная смазка для листовых рессор автотранспортных средств, жидком и газообразном. Смазкой создается промежуточная жидкая или пластичная прослойка, служащая для замены сухого трения внутренним вязкостным трением самой смазочной прослойки.

При газовой и жидкостной смазке происходит разделение поверхностей трения слоем газа или жидкости, которые сохраняют свои

объемные свойства и снижают коэффициент трения в 50–100 раз по сравнению с трением без смазочного материала. Полужидкостной является такая смазка, которая не полностью разделяет детали слоем жидкости. Граничная смазка имеет место, когда свойства смазки отличаются от объемных свойств.

Коэффициенты трения при жидкой и полужидкой смазке зависят от качества, вязкости и температуры смазки, скорости относительно перемещения поверхностей трения и давления на них, конструктивно-технологических параметров сопряженных деталей.

Смазка уменьшает коэффициент трения до 0,001 (коэффициент трения несмазанных поверхностей составляет 0,1–0,8), износ и нагрев деталей, увеличивает коэффициент полезного действия (КПД) машин.

По своей природе смазочные материалы могут быть растительного, животного и минерального происхождения, а также смешанные (компаундные) и искусственные. Выбор типа смазочного материала зависит от условий, в которых работают машины, их мощности и др. Наибольшее распространение получили минеральные жидкие и консистентные или пластичные смазки. Твердые смазки применяются в условиях высоких или низких температур, газовые – в условиях высоких скоростей.

Лучшей с механической стороны будет такая смазка, которая при наименьшем собственном внутреннем трении обеспечивает минимальное общее трение и достаточную толщину смазочной прослойки и таким образом сохраняет жидкостное трение. Лучшей с физико-механической стороны является такая смазка, которая обладает наибольшей способностью проникать в узкий зазор между поверхностями трения, наибольшим расклинивающим действием и наибольшим сопротивлением выжиманию из зазоров. Во всех случаях смазка должна удовлетворять химической и физической стабильности и экологической безопасности.

Наиболее важными в теории смазки понятиями и одновременно свойствами смазок являются вязкость и маслянистость.

Вязкость масла есть мера его подвижности, его внутреннего трения и обратно пропорциональна текучести масла. При рабочей температуре агрегата вязкость должна иметь оптимальное значение, так как повышенная вязкость ведет к увеличению сопротивления передвижению, необходимого для реализации жидкостного трения.

Абсолютная вязкость – это сила, которая требуется для передвижения плоской поверхности площадью, равной одной единице, относительно другой такой же поверхности, от которой она отделена слоем жидкости, имеющим толщину, равную единице.

Удельная вязкость – это вязкость в единицу времени. Показателем качества автомобильных масел является кинематическая вязкость, определяемая по стандарту и выражаемая в стоксах (сантиметр квадратный на стокс). Вязкостно-температурные свойства характеризуют изменение вязкости масла при изменении температуры и оцениваются индексом вязкости. Чем выше этот показатель, тем лучше вязкостно-температурные свойства масла, тем меньше изменяется вязкость масла при изменении температуры и тем лучше его пусковые качества.

Маслянистость представляет собой поверхностное натяжение смазки и определяет прочность масляных пленок на поверхности металла. Смазочные масла смачивают металлические поверхности потому, что сила их поверхностного натяжения меньше силы притяжения к металлу. Разной величиной поверхностного натяжения смазочных масел объясняют их различную способность смачивать металлические поверхности. Но сама природа и истинное значение поверхностного натяжения в явлениях смазки изучена недостаточно.

2.2. Особенности смазочных материалов и требований к ним

Современные автомобильные смазочные материалы представляют собой продукты, получаемые из нефти и состоящие из циклановых, ароматических, циклоароматических и алканоциклоароматических углеводородов. По назначению и области применения смазки делятся на моторные, трансмиссионные, пластичные (консистентные), специальные и др.

Основу современных масел для двигателей составляют хорошо очищенные базовые масла, для улучшения качества которых применяются различные присадки, содержащие барий, кальций, цинк, фосфор и другие элементы, и их соединения.

Масла для дизелей более вязкие, чем для бензиновых двигателей, что вызвано повышенными удельными нагрузками на детали кривошипно-шатунного механизма и более высокими тепловыми режимами их работы. Поэтому дизельные масла должны отвечать

более высоким эксплуатационным требованиям, что достижимо подбором соответствующих присадок.

При эксплуатации автотранспортной техники трансмиссионные масла и их характеристики изменяются. Наиболее достоверным критерием установления периодичности смены масла является оценка качества масла по браковочным показателям, согласно которым замену масла необходимо производить, если достигнуты предельные значения одного или нескольких показателей.

Общество автомобильных инженеров (SAE) разработало классификацию масел по вязкости, причем условный цифровой индекс вязкости входит в обозначение масла.

Трансмиссионные масла предназначены для смазывания зубчатых передач, подшипников и других элементов машин. Условия работы трансмиссионных масел транспортных средств имеют ряд особенностей: высокие удельные нагрузки в зоне зацепления зубчатых колес, граничное трение, высокие скорости, широкий интервал рабочих температур и др.

Автомобильные трансмиссионные масла должны обеспечить уменьшение износов деталей трансмиссии, уменьшить силу трения, обеспечить отвод тепла, удаление продуктов износа из зон трения сопряжений, отсутствие коррозионной агрессивности по отношению к деталям.

В зависимости от напряженности работы агрегатов трансмиссионные масла подразделяются на следующие группы:

- без присадок или с мягкими противоизносными присадками для цилиндрических, конических передач, работающих при умеренных нагрузках и невысоких рабочих температурах;
- с противозадирными присадками средней активности для спирально-конических передач;
- для гипоидных передач с высокоэффективными противозадирными присадками;
- для гидромеханических и автоматических передач;
- универсальные.

В зависимости от климатических условий жидкие масла подразделяются на летние, зимние, всесезонные, северные, арктические, отличающиеся своими вязкостно-температурными свойствами.

Пластические смазки представляют собой минеральные масла, загущенные до мазеподобного состояния с помощью кальциевых,

натриевых, литиевых и других компонентов на основе натуральных жиров или синтетических жирных кислот.

Исходя из специфических условий работы пластических смазок, к ним предъявляют следующие требования:

- обеспечение минимальных величин трения и износа;

- надежное удержание в узле трения;

- достаточная механическая стабильность, устойчивость к воздействию повышенных температур, нагрузок, кислорода воздуха, влаги, пыли и агрессивных компонентов атмосферы;

- надежность эксплуатации при низких температурах.

Кроме того, для пластических смазок важна величина такого показателя, как эффективная вязкость, которая характеризует уровень и постоянство энергетических затрат в узле трения.

Весьма актуальны и существенны и такие показатели, как предел прочности и термическое упрочнение, определяющие способность смазки удерживаться на движущихся деталях в негерметизированных узлах трения и сохранять свои свойства в процессе эксплуатации.

Показателями качества пластических смазок также являются:

- пенетрация, характеризующая консистенцию (густоту) смазки;

- температура каплепадения, по которой определяется верхний температурный предел работоспособности смазки;

- коллоидная и механическая стабильность, характеризующая постоянство состава и свойств смазки при хранении и эксплуатации.

Среди пластических смазок, применяемых на транспорте, выделяют четыре вида: антифрикционные, консервационные, уплотнительные и канатные.

Общими параметрами качества для всех смазочных материалов являются вязкость, маслянистость, содержание серы, воды и механических примесей, коррозионная агрессивность, испаряемость и др.

К основным эксплуатационным требованиям в отношении смазочных материалов следует отнести:

- бесперебойное поступление ко всем узлам трения в механизмах и агрегатах;

- удержание масла в узлах трения на всех режимах работы агрегата, в том числе и при остановке;

- образование надежных прочных масляных пленок на трущихся поверхностях;

- охлаждение трущихся деталей и отвод тепла от мест трения;

вынос продуктов износа из зоны трения и защита этих зон от проникновения в них вредных реагентов извне;

уплотнение зазоров в сопряжениях, где это необходимо по условиям работы механизма;

возможно большая стабильность при окислении, механическом воздействии и обводнении;

минимальная токсичность, а также приемлемая стоимость, широкая сырьевая база, достаточный ресурс до замены масла и его способность к регенерации.

В свою очередь, реализация данных требований к смазочным материалам предполагает у них наличие таких свойств, как:

оптимальная вязкость, обеспечивающая надежную и экономичную работу агрегатов на всех режимах;

хорошая смазывающая способность для предотвращения интенсификации износов;

достаточная химическая стойкость, обеспечивающая минимальное изменение структуры и образование коррозионно-активных включений и отложений;

устойчивость к процессам испарения, вспенивания и образования эмульсий, выпадению присадок;

защита поверхностей трения от воздействия агрессивных сред.

Условия работы масел в агрегатах транспортных средств постоянно усложняются. Форсирование нагрузочных и скоростных режимов двигателей, увеличение удельных нагрузок на детали агрегатов трансмиссии и сочетания различных видов нагрузок приводят к росту температуры агрегата и интенсификации процессов износа деталей и старения масла. Поэтому исследования в области повышения качества смазочных материалов актуальны и имеют долгосрочные перспективы.

Однако необходимо отметить, что эффективность процессов смазки зависит не только от качества смазочных материалов, но и от способов и систем подачи смазки. Способы подачи смазки в современных транспортных средствах могут быть классифицированы по следующим признакам:

– по количеству одновременно задействованных точек смазки – индивидуальная и централизованная;

– характеру действия во времени: периодическая и непрерывная смазка;

- способу подачи масла к трущимся парам – под принудительным давлением и без него;
- характеру циркуляции масла в системе смазки – проточные, циркуляционные и смешанные;
- степени механизации – ручная, механизированная, автоматическая.

Для двигателей и других агрегатов транспортных средств особое значение имеет гидродинамическая теория смазки.

2.3. Гидродинамическая теория смазки

Гидродинамическая теория смазки наилучшим образом разработана в отношении подшипников скольжения жидкостного трения и базируется на следующих основных суждениях:

смазка движется ламинарно в области трения. Градиенты скоростей имеют существенное значение только на оси, перпендикулярной к поверхности трения;

смазка налипает на поверхности трения, и поверхностные явления не нарушают прилипания;

кривизна масляного слоя в результате его малой толщины не принимается в расчет;

влияние капиллярных сил, а также сил тяжести и инерции не учитывается;

сжимаемость смазочного слоя не учитывается.

Основное дифференциальное уравнение гидродинамической теории смазки, которое является результатом совместного решения шести уравнений для вязкой жидкости, уравнения непрерывности и трех уравнений движения, после ряда преобразований и упрощений имеет следующий вид:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left[\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial \alpha} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z} \right] + 6 \frac{v}{r} \frac{\partial h}{\partial \alpha} = 0,$$

где r – радиус цапфы;

α – угол в радианах;

h – толщина масляной пленки в заданной точке;

η – вязкость масла;

p – удельное гидродинамическое давление;
 z – координата, отсчитываемая от середины вкладыша в осевом направлении параллельно поверхностям трения;
 v – скорость скольжения цапфы.
 Сила трения T и расход смазки Q , а также удельная сила трения на цапфе τ определяются по уравнениям

$$T = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \tau r d\alpha dz;$$

$$Q = \frac{1}{6} \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial z};$$

$$\tau = \eta \frac{v}{h} - \frac{h}{2r} \frac{\partial p}{\partial \alpha}.$$

Обычно теория основывается не только на использовании определенных зависимостей, но и на принятии ряда ограничений и допущений, что можно проследить и на примере рассматриваемой теории.

Так, для решения приведенных выше уравнений вводятся следующие допущения:

1. Поверхности трения представляют собой части окружностей. Изменения поверхностей трения, которые происходят при износе и упругих деформациях, не учитываются.

2. Считается, что на границах области трения давление равно нулю.

3. Рассматривается работа подшипника при установившемся движении и, в частности, при нагрузке, постоянной по величине и направлению.

4. Вязкость смазки внутри подшипника принимается постоянной, соответствующей некоторой средней температуре.

5. Принимается, что вязкость смазки не зависит от давления.

6. Считается, что угол обхвата вкладыша равен 180° и подшипник центрально нагружен.

Отказ от любого из перечисленных допущений требует иной процедуры решения.

На основании функциональных экспериментальных зависимостей данной теории рассчитываются подшипники, величины зазоров, допусков, определяются сорта масел, обеспечивающих нормальную работу подшипника в условиях жидкостного трения при заданных величинах нагрузок и скоростей. При проверочных расчетах определяют рабочее значение минимальной толщины масляной пленки в подшипнике, которым лимитируется возможность работы в условиях жидкостного трения.

Теории трения, смазки и износа по многим параметрам коррелируют между собой, имеют общие точки соприкосновения и взаимодействия и объединяются общими подходами трибологии.

2.4. Методика создания компаундированных масел

Создавать масла сложного состава, состоящие из нескольких компонентов минерального, растительного или другого происхождения, возможно с помощью теории планирования экспериментов, а именно, симплекс-решетчатого планирования, решающего задачи в формате «состав–свойства».

Математическая постановка задачи записывается следующим образом:

$$X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_i + \dots + X_k = 1 \text{ или } 100 \%,$$

то есть составляющие X_i образуют целое.

Если выбирается состав компаундированного масла из трех компонент, то его модели первого и второго порядка в симплексной форме соответственно будут

$$Y = \vec{B}_1 X_1 + \vec{B}_2 X_2 + \vec{B}_3 X_3$$

и

$$Y = \vec{B}_1 X_1 + \vec{B}_2 X_2 + \vec{B}_3 X_3 + \vec{B}_{12} X_1 X_2 + \vec{B}_{13} X_1 X_3 + \vec{B}_{23} X_2 X_3,$$

где Y – параметр оптимизации, свойство масла, которое должно быть получено в результате эксперимента, например, маслянистость, вязкость и др.;

\vec{B}_i – коэффициенты модели (векторы).

Как видно из приведенного, в отличие от записи моделей в обычной декартовой системе координат в моделях (уравнениях) отсутствуют B_0 и X_0 , а также X в степени, в данном случае в квадрате. Модели в симплексной форме становятся компактнее, проще, и, кроме того, симплексы позволяют получить простые формулы для вычисления коэффициентов моделей:

$$\vec{B}_1 = Y_1, \quad \vec{B}_2 = Y_2, \quad \vec{B}_3 = Y_3,$$

а для бинарных коэффициентов с эффектами взаимодействия факторов

$$\vec{B}_{12} = 4Y_{12} - 2Y_1 - 2Y_2; \quad (2.1)$$

$$\vec{B}_{13} = 4Y_{13} - 2Y_1 - 2Y_3; \quad (2.2)$$

$$\vec{B}_{23} = 4Y_{23} - 2Y_2 - 2Y_3, \quad (2.3)$$

где $Y_1, Y_2, Y_3, Y_{12}, Y_{13}, Y_{23}$ – экспериментальные значения параметра оптимизации, полученные в соответствующих обязательных экспериментах.

Количество и структура (содержание) обязательных экспериментов строго регламентируются, что будет отражено в табл. 2.1. Количество обязательных экспериментов определяется как число возможных сочетаний двух параметров – количества составляющих в моделях (количества X) и полинома (степени X) модели. Чем больше число составляющих в модели и выше степень, тем больше потребуется произвести обязательных экспериментов. Например, для модели из трех X первого порядка необходимо провести три обязательных эксперимента, второго порядка – шесть, третьего – десять, четвертого – пятнадцать. Во всех экспериментах: обязательных и дополнительных, проведенных по усмотрению исследователя, должно выполняться неперемное условие – сумма всех компонентов в эксперименте равна 100 % или 1.

Обозначение функции отклика (параметра оптимизации) во всех обязательных экспериментах происходит специальным образом, отражающим степень влияния участвующих в эксперименте факторов, а также структуру эксперимента (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1

Обозначение функции отклика в симплекс-решетчатых планах для трехкомпонентной модели

№ опыта	Квадратичная модель				№ опыта	Модель третьего порядка			
	X_1	X_2	X_3	Y		X_1	X_2	X_3	Y
1	1	0	0	Y_1	1	0	0	Y_1	
2	0	1	0	Y_2	2	0	1	Y_2	
3	0	0	1	Y_3	3	0	0	Y_3	
4	1/2	1/2	0	Y_{12}	4	1/3	2/3	Y_{122}	
5	1/2	0	1/2	Y_{13}	5	1/3	0	Y_{133}	
6	0	1/2	1/2	Y_{23}	6	0	1/3	Y_{233}	
					7	2/3	1/3	Y_{112}	
					8	2/3	0	Y_{113}	
					9	0	2/3	Y_{223}	
					10	1/3	1/3	Y_{123}	

Таким образом, как видно из табл. 2.1, значение функции отклика на решетке планирования обозначается специальным образом. Это обозначение показывает относительное содержание компонент в этой точке, в данном эксперименте в долях от целого или процентах.

Параметрами оптимизации (функциями отклика) для компаундных масел могут быть вязкость, маслянистость, щелочность, температура вспышки или застывания, число нейтрализации и т. д.

По выбранному параметру оптимизации проводятся натурные эксперименты, результаты выполнения которых сводятся в соответствующую таблицу.

В каждом эксперименте проводится одинаковое количество параллельных опытов (в данном примере – два) – натурные измерения исследуемого параметра. По ним рассчитываются среднее значение функции отклика и построчечная дисперсия D_i . Также необходимо рассчитать сумму всех построчечных (дисперсия по параллельным опытам) дисперсий и общее среднеквадратическое отклонение замеров по исследуемому параметру для всех экспериментов.

После такой обработки матрицы симплекс-решетчатого планирования по экспериментам следует перейти к исследованию гипотезы о возможности применения модели (уравнения) второго порядка для решения поставленной задачи – создания трехкомпонентного компаундного масла с требуемым значением параметра оптимизации.

Для этого содержащиеся в матрице экспериментальные данные сначала необходимо оценить на пригодность для дальнейшего использования, для чего проводится проверка воспроизведения эксперимента или иначе – проверка однородности дисперсий замеров функции отклика, которая выполняется с помощью критерия Кохрена.

Для вычисления экспериментального значения критерия Кохрена необходимо максимальную построчечную дисперсию D_i из табл. 2.2 разделить на сумму всех дисперсий. Если полученное значение будет меньше табличного значения данного критерия, то можно перейти к следующему этапу решения задачи, а именно, вычислению коэффициентов модели по формулам (2.1)–(2.3) и используя информацию из матрицы планирования (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Матрица симплекс-решетчатого планирования второго порядка для трехкомпонентного масла

№	Состав масла			Параллельные опыты		Среднее значение	Дисперсия
	X_1	X_2	X_3	Y^*	Y^{**}		
Обязательные эксперименты							
1	1	0	0	Y_1^*	Y_1^{**}	Y_1	D_1
2	0	1	0	Y_2^*	Y_2^{**}	Y_2	D_2
3	0	0	1	Y_3^*	Y_3^{**}	Y_3	D_3
4	1/2	1/2	0	Y_{12}^*	Y_{12}^{**}	Y_{12}	D_4
5	1/2	0	1/2	Y_{13}^*	Y_{13}^{**}	Y_{13}	D_5
6	0	1/2	1/2	Y_{23}^*	Y_{23}^{**}	Y_{23}	D_6
Дополнительные эксперименты, проводимые по усмотрению исследователя							
7	1/3	1/3	1/3	Y_7^*	Y_7^{**}	Y_7	D_7
...
k	Y_k	D_k
							$\Sigma D_i =$

Следующим этапом решения задачи является проверка полученной численной модели второго порядка из трех компонентов на адекватность, которая в планировании экспериментов выполняется с помощью критерия Стьюдента. Этот критерий используется для проверки каждого дополнительного эксперимента по отдельности.

Экспериментальное значение критерия Стьюдента вычисляется по формуле

$$t_i = \frac{(Y_i(p) - Y_i(\vartheta))\sqrt{Ч}}{\sigma_{\text{общ}} \sqrt{(1 + \varepsilon)}}. \quad (2.4)$$

В числителе критерия (2.4) мы имеем разность между расчетным и экспериментальным значением параметра оптимизации i -го дополнительного эксперимента, помноженную на корень квадратный из числа параллельных опытов, в данном случае $Ч = 2$. В знаменателе формулы – общее среднеквадратическое отклонение по всем экспериментам (корень квадратный из суммы всех по строчечных дисперсий, деленной на общее количество экспериментов), умноженное на корень квадратный из $(1 + \varepsilon)$, где ε – постоянное для экспериментов с заданным количеством компонентов.

Например, для любых трехкомпонентных моделей, факторным пространством для которых является равносторонний треугольник это точка в его центре и всегда $\varepsilon = 0,628$.

Если хотя бы для одного из проведенных добавочных экспериментов будет наблюдаться условие неадекватности, то есть расчетное экспериментальное значение критерия больше табличного, то делается вывод, что исследуемая модель не адекватна изучаемому объекту.

В данном случае симплекс-решетчатое планирование в отличие от других методов оптимизации предоставляет возможность исследователю перейти на модель (уравнение) более высокого порядка, и часто такая модель оказывается адекватной.

Если модель адекватна, то возможно решение двух задач:

- 1) определить искомое значение параметра оптимизации для создаваемого компаундированного масла;
- 2) по модели подобрать такой состав масла, который обеспечит необходимое значение параметра оптимизации.

Рассмотренная методика применяется для решения однопараметрических задач оптимизации. Но если сначала провести оптимизацию состава масла по одному параметру, например вязкости, то затем можно повторить все рассмотренное выше по другому параметру оптимизации, например маслянистости и т. д., то есть перейти к многошаговой, многопараметрической оптимизации масел сложного состава – компаундированных масел.

Более того, методика позволяет проводить двух- и более параметрическую оптимизацию одновременно. Для этого необходимо расширить рассмотренные табл. 2.1 и 2.2, ввести в них добавочные параметры оптимизации и исследовать соответствующие модели, функции отклика, они же параметры оптимизации, например: Y – вязкость, Z – маслянистость.

2.5. Исследование смазочных материалов с учетом фактора времени

Изменение физико-химических свойств масел в сочетании с продуктами износа деталей и другими примесями оказывает значительное влияние на интенсификацию процессов износа деталей транспортных средств, сопровождается нагарообразованием и сокращением срока службы масел и самих машин.

Под действием повышенных температур ускоряются процессы старения масел, связанные с ухудшением их смазывающих свойств. Это особенно наглядно проявляется в зоне поршневых колец двигателя, где тонкая пленка масла имеет высокую температуру и значительную концентрацию продуктов сгорания топлива с сернистыми включениями, снижающих щелочность масла и способствующих образованию сульфоновых кислот асфальтенов, забивающих кольцевые канавки и вызывающих пригорание поршневых колец двигателя.

Для уменьшения интенсивности износа необходимо повышать щелочность масла, для чего применяются соответствующие присадки. Зависимость скорости износа деталей v от щелочности K аппроксимируется следующей экспериментальной зависимостью:

$$v = 1 / (a + bK),$$

где a и b – коэффициенты.

Щелочность масла с присадками оценивают по концентрации водородных ионов, которую принято характеризовать величиной водородного показателя рН:

$$pH = -\lg(H),$$

где Н – концентрация водородных ионов.

Для нейтральной среды $pH = 7,0$; для щелочной $pH > 7,0$. Щелочность масла может быть определена потенциометрическим титрованием спиртобензольного раствора масла 0,1н (децинормальным) раствором соляной кислоты.

По мере увеличения пробега автомобиля щелочность масла уменьшается из-за расхода присадки на диспергирование поступающих в масло нерастворимых загрязнений, поэтому, добавляя в масло щелочную присадку, можно обойтись без его замены или значительно увеличить ресурс масла.

В общем виде старение масла в двигателях зависит от теплонапряженности деталей, параметров масляной системы (объем масла в системе, режим долива масла, кратность циркуляции, эффективность фильтров очистки), условий работы двигателя, исходного качества масла и наличия присадок.

Для оценки качества масла в процессе эксплуатации вводится показатель – коэффициент m , который определяют как частное от деления сгоревших примесей на массу несгоревших. Данный коэффициент характеризует отношение органической части примесей к неорганической и является мерой интенсивности износа деталей. Низкий качественный состав примесей в масле является показателем его невысоких противоизносных свойств. Коэффициент m меняется в процессе эксплуатации транспортных средств в широких пределах, например, от 5 до 20 для дизельного двигателя при применении различных партий масла одного сорта.

Для большинства транспортных средств в процессе углубленного диагностирования состояние масла является ценным диагностическим параметром и с помощью спектрального и других методов анализа состава масла используется для определения технического состояния и остаточного ресурса основных агрегатов.

Под *сроком службы* масла понимают время или пробег, в течение которого браковочный показатель достигает предельного зна-

чения. За браковочный показатель принимают диспергирующую способность масла, коксуемость, снижение вязкости, температуру вспышки, увеличение содержания воды, щелочность масла и содержание нерастворимых примесей. Срок службы масла зависит от его исходного качества, а значит, его исходных физико-химических свойств и их стабильности.

Срок службы масла связан с расходом последнего. Расход масла в двигателях зависит от угара и его утечки через соединения картера. За *угар* масла принимают разность между количеством масла, попадающим в зону поршневых колец, и тем его количеством, которое стекает обратно в картер. Угар масла в двигателе неизбежен, так как углеводороды масла испаряются и разлагаются при высокой температуре. Существует метод диагностирования технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя по угару масла, основанный на том, что по мере увеличения нагара интенсивность износа этих деталей уменьшается.

Экспериментально установлено экспоненциальное возрастание загрязненности масла X , а значит и интенсивности износа деталей V по мере увеличения пробега автомобиля:

$$V = v_0 (1 - e^{-aL}),$$

так как

$$v_0 = KX,$$

где a – коэффициент пропорциональности.

L – пробег автомобиля, тыс. км;

K – щелочность масла.

Как видно из приведенных формул, износ деталей напрямую связан с состоянием смазочных материалов. Более подробно процессы изнашивания рассматриваются в теории износа.

3. ТЕОРИЯ ИЗНОСА

3.1. Понятийный аппарат теории износа

Существуют различные варианты определения износа. Например, по ГОСТ 16429–70 под износом понимается результат изнашивания, проявляющийся в виде отделения или остаточной деформации материала. Согласно ГОСТ 23.002–89 износ – это процесс разрушения и отделения материала поверхности твердого тела и накопление его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

По П. А. Рибендеру, процесс изнашивания – это поверхностное диспергирование и измельчение в результате многократной пластической деформации с последующим упрочнением и усталостным разрушением. Адсорбционное или адсорбционно-химическое действие окружающей среды облегчает пластическое деформирование и хрупкое разрушение металла в поверхностном слое. Исследователи Боуден и Тейлор считают, что при трении образуются мостики сварки, и рассматривают износ как результат удаления с поверхности трения приварившихся выступов, разрушающихся на некоторой глубине.

Общепринято, что изнашивание – это процесс изменения технического состояния деталей, а износ – результат изнашивания, определяемый в установленных единицах, например, микрометр на километр пробега.

Выявление физических закономерностей износа, определение зависимости физико-механических свойств поверхностного слоя детали от режима ее работы и внешних условий создают предпосылки для управления процессом изнашивания с учетом конкретных обстоятельств функционирования транспортных средств и их элементов, что и является целью, предметом и содержанием теории износа.

3.2. Характеристики износа и методы их определения

К основным характеристикам изнашивания традиционно относят скорость и интенсивность износа, износостойкость, относительную износостойкость, абсолютный (линейный) износ.

Скорость изнашивания v характеризует отношение величины износа h ко времени его возникновения t :

$$v = dh / dt.$$

Под интенсивностью изнашивания i понимается отношение износа к пути s , на котором происходило изнашивание, или же к объему выполненной работы:

$$i = dh / dS.$$

Износостойкость представляет собой свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания.

Относительная износостойкость – это отношение износостойкости исследуемого материала к износостойкости эталонного материала при одинаковых условиях испытаний.

Абсолютный (линейный) износ оценивается изменением размера детали в результате изнашивания в направлении, перпендикулярном к поверхности трения, и является наиболее распространенной характеристикой износа автомобильных деталей.

Наиболее известными методами определения износа считаются такие, как контроль за изменением эксплуатационных показателей работы элементов транспортных средств, микрометрирование, взвешивание деталей, определение концентрации продуктов износа в масле, применение радиоактивных индикаторов, метод вырезанных лунок, спектральный анализ.

Более подробно перечисленные и другие методы определения износа рассматриваются в специальной литературе.

При оценке явлений и процессов износа применяются такие понятия и термины, как скачкообразное движение при трении, схватывание при трении, перенос материала, заедание, задир, царапание, отслаивание, выкраивание, приработка.

Скачкообразное движение при трении – явление чередования относительного скольжения и относительного покоя или чередование увеличения и уменьшения относительной скорости скольжения, возникающее самопроизвольно при трении, например, вследствие автоколебаний при понижении коэффициента трения с увеличением скорости скольжения.

Схватывание при трении – явление местного соединения двух твердых тел вследствие действия молекулярных сил при трении.

Перенос материала наблюдается при трении твердых тел и состоит в том, что материал одного тела соединяется с другим и, отрываясь от первого, остается на поверхности второго.

Задание – процесс возникновения и развития повреждений поверхностей трения вследствие схватывания и переноса материала.

Задир – повреждение поверхности трения в виде широких и глубоких борозд в направлении скольжения.

Царапание – образование углублений на поверхности трения в направлении скольжения при воздействии выступов твердых тел или твердых частиц.

Отслаивание – отделение с поверхности трения материала в форме чешуек при усталостном изнашивании.

Выкраивание – образование ямок на поверхности трения в результате отделения частиц материала при усталостном изнашивании.

Приработка – процесс изменения геометрии поверхностей и физико-химических свойств поверхностных слоев материала в начальный период трения, характеризующийся постепенным уменьшением интенсивности износа и стабилизацией скорости износа в установившихся условиях эксплуатации.

3.3. Классификация износов

Все встречающиеся в работающих механизмах транспортных средств износы могут подразделяться на две основные группы. К первой группе относятся износы, которые медленно возрастают и являются результатом сил трения, воздействия высоких температур и других факторов, но в нормальных условиях эксплуатации, а значит, при выполнении требуемых для данного механизма правил эксплуатации. Такие износы принято называть *естественными*. Ко второй группе относят износы, которые увеличиваются быстро, стремительно и наблюдаются даже после непродолжительной работы механизма. Обычно они являются результатом несоответствующего, некачественного проведения технического обслуживания и ремонта, нарушения правил и технических условий эксплуатации или же возникают из-за конструктивных недоработок и дефектов производства.

Виды естественных износов деталей транспортных средств

Как правило, детали транспортных средств подлежат восстановлению или выбраковке в результате изменения:

- первоначальных размеров детали, что вызывается механическими износами;
- механических и физико-химических свойств деталей, обусловленных химическими износами.

Случается, что оба вида износа присутствуют одновременно в одних и тех же деталях.

В свою очередь, среди механических износов выделяют следующие виды: абразивный, эрозионный, усталостный, износ при фреттинге и др.

Абразивный износ является результатом режущего и царапающего действия твердых частиц, которые находятся между поверхностями трения и являются следствием изнашивания трущихся поверхностей деталей и попадания извне песка и пыли, что способствует интенсификации процессов износа.

Следует отметить, что размеры абразивных частиц по мере увеличения длительности работы механизмов уменьшаются, что ведет к значительному снижению их абразивной агрессивности. В среднем, по данным исследований профессора С. В. Шумика, абразивный износ деталей агрегатов трансмиссии автомобилей составляет 2–11 мкм / 1000 км пробега.

Коэффициент трения при абразивном изнашивании находится в интервале 0,2–0,6, геометрическое состояние поверхностей соответствует от 3-го до 7–8-го класса шероховатости и выше.

В абразивной среде в процессе трения происходит скольжение абразивных частиц, пластическое деформирование металла, внедрение частиц в местах их контакта с деталью и разрушение поверхностных слоев без отделения металла или со снятием микростружки.

Поэтому механохимическая модель абразивного изнашивания включает в себя механический контакт и упругопластическую деформацию, образование слоя деформированного активированного металла и его взаимодействие с химически активными компонентами среды, ведущее к образованию ослабленных вторичных струк-

тур и их последующему разрушению. К такому выводу пришел в своих исследованиях профессор Ф. Н. Авдонькин.

Примерами абразивного изнашивания могут служить цилиндропоршневая группа двигателя, зубья шестерен и подшипники агрегатов трансмиссии, открытые сопряжения в ходовой части транспортных средств.

Выделяют также гидроабразивный и газоабразивный износ.

Гидроабразивное изнашивание происходит под воздействием твердых частиц, завислых в суспензированной жидкости, которые перемещаются относительно поверхности детали. Этому виду износа подвергаются топливные, масляные и водяные каналы, а также детали, которые смазываются под давлением. Абразивными частицами являются частички кварца, нагара, продукты износа и др.

Газоабразивный износ возникает под воздействием частиц, завислых в газе. Такой износ свойственен впускным и выпускным системам автомобильных двигателей, а также внешним лакокрасочным покрытиям кузовов.

Трение струй жидкости и газов о поверхности деталей вызывает их эрозионный и кавитационный износ.

Эрозионный износ относится к механическим видам износа в результате воздействия на поверхность детали струи жидкости (гидроэрозионный износ) или газа (газоэрозионный износ). Гидро- и газоэрозионное изнашивание представляет собой процесс вымывания и вырыва отдельных микрообъемов материалов. Такой износ наиболее характерен для топливной аппаратуры и клапанов газораспределительного механизма.

Выделяют также *электроэрозионный* износ, представляющий собой разновидность эрозионного износа в результате воздействия разряда при прохождении электрического тока, как это имеет место между электродами свеч зажигания.

Кавитация представляет собой процесс образования и поглощения пузырьков в жидкости на поверхности деталей при определенных соотношениях давления, температур и скоростей по переменным сечениям струи. Разрушение кавитационных пузырьков сопровождается гидравлическим ударом на поверхности деталей, что приводит к образованию каверн, полостей. *Кавитационный износ* наблюдается на поверхностях гильз цилиндров двигателя, в полостях водяных насосов и др.

Для многих деталей транспортных средств характерен *усталостный износ*. Усталостный износ обусловлен тем, что поверхностный слой материала в результате трения и циклических нагрузок делается хрупким и разрушается. Чаще всего это имеет место на дорожках подшипников и зубьях шестерен. Усталостное изнашивание поверхностей трения происходит при их качении и скольжении, вызывающих повторное деформирование микрообъемов металла с последующим возникновением трещин и отделением частиц. Причинами этого вида износа являются микропластические деформации и упрочнение поверхности слоев трущихся деталей, что сопровождается напряженным состоянием и проявлением признаков усталости при знакопеременных нагрузках.

Известен износ при **фреттинге**. Это механический износ соприкасающихся деталей при малых колебательных движениях. Если при этом наблюдается агрессивное воздействие среды, то происходит износ, определяемый как износ при *фреттинг-коррозии*.

Например, такой износ имеет место в точках контакта вкладышей шеек коленчатого вала и их постелей в картере.

При динамической нагрузке, сопровождающейся вибрацией и ударами, окисление соприкасающихся поверхностей интенсифицируется из-за активизации пластически деформируемого металла.

Динамика нагружения деталей транспортных средств вызывает рост градиента температур и деформаций, способствует окислению и схватыванию поверхностей. Фреттинг-процесс присущ трению скольжения с малыми возвратно-поступательными перемещениями в условиях динамического нагружения и может быть отнесен к процессу, граничащему между химической коррозией и эрозией, так как интенсивность фреттинг-коррозии повышается с увеличением доступа кислорода, но уменьшается при увлажнении воздуха.

Изнашивание при фреттинг-коррозии и окислительный износ относятся к коррозионно-механическим износам.

Окислительный износ происходит в результате соединения механического износа и агрессивного воздействия среды, в результате чего на поверхности трения образуются непрочные пленки окислов, которые снимаются при механическом трении, а оголяющиеся поверхности вновь окисляются. Такой износ наблюдается на деталях цилиндропоршневой группы, гидроусилителей, деталях тормозной системы с гидроприводом. При окислительном износе имеет место

взаимодействие активных, пластически деформированных слоев металла толщиной 10–100 нм с атомами кислорода или смазки. Это сопровождается образованием химически адсорбированных пленок твердых растворов и химических соединений металла с кислородом, которые затем удаляются с поверхности трения. Согласно исследованиям Б. И. Костецкого окислительный износ характеризуется сочетанием пластической деформации микроскопических объемов металла поверхностных слоев и диффузии кислорода воздуха в деформируемые слои деталей. Сначала на поверхностях трения образуются пленки твердых растворов кислорода, затем – химические соединения кислорода с металлом.

В процессе окислительного износа можно выделить этапы деформирования, активизации, образования вторичных структур и разрушения. Износостойкость деталей при окислительном износе зависит от пластичности металла, скорости окисления и природы окислов. Мягкие стали в большей степени подвержены окислению и пластическому деформированию.

Окислительный износ имеет место при трении скольжения и трении качения, причем при трении скольжения он является ведущим, а при трении качения – сопутствующим другим видам износа, чаще всего питтингу.

Детали зубчатых механизмов автомобилей (коробка передач, раздаточная коробка, главная передача, дифференциал) работают в условиях высоких удельных нагрузок (до 40 Н/м^2) циклического характера при частом возникновении граничной смазки, наличии абразива в смазке и переменном режиме нагрузок и скоростей, что обуславливает явление *осповидного износа* или питтинга.

При **питтинге** преобладает сочетание механического и молекулярно-механического изнашивания и расклинивающих разрушений. Образование питтинга сводится к следующему. На поверхностях трения зубчатого зацепления постепенно образуются микротрещины. Смазка, которая попадает в эти трещины, заполняет их и прочно удерживается там полярной активностью молекул. В дальнейшем при сдавливании краев трещин под воздействием высоких удельных нагрузок масло расклинивает их, разрушает металл и образует оспины.

Под упомянутым выше *молекулярно-механическим* износом понимается одновременное механическое воздействие и воздействие молекулярных или атомарных сил.

Особый вид механического изнашивания происходит в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности на другую и трения неровностей сопряженных поверхностей. Это ведет к задирам, заклиниванию и разрушению механизмов.

Например, заклинивание коленчатого вала при недостаточной смазке сопровождается разрывом масляных пленок, сильным нагревом и сваркой частиц металла.

В особый вид износа выделяют также *тепловой* износ. Тепло, которое возникает в местах контакта в микроскопических объемах, ведет к отпуску, закалке, рекристаллизации и оплавлению.

Данному износу подвержены гильзы цилиндров двигателей, кулачки распределительных валов и тарелки толкателей клапанов газораспределительных механизмов. Тепловой износ, возникающий при высоких температурах, вызванных трением деталей при больших скоростях скольжения и больших удельных давлениях, способствует размягчению поверхностных слоев металла, контактному схватыванию, смятию, налипанию и последующему разрушению малых объемов трущихся поверхностей. При этом виде износа большое значение приобретает теплоустойчивость металла.

В конце XX в. было экспериментально обнаружено неизвестное ранее явление концентрации в поверхностных слоях трущихся деталей водорода, выделяющегося из материалов пары трения и окружающей среды – **водородный износ**. Водородное изнашивание характеризуется интенсивным выделением водорода в результате трибодеструкции водородосодержащих материалов, ускоряемой механохимическим действием. Оно характеризуется диффузией водорода в деформируемый слой стали и особым видом разрушения, связанным с одновременным появлением большого числа «зародышей» трещин во всей зоне деформации и накоплением водорода. Водородное изнашивание вносит новые представления о механизме хрупкого разрушения.

Защита от водородного изнашивания имеет особое значение для следующих отраслей: водородная энергетика, авиатехника, железнодорожный транспорт, морской флот, автомобильный транспорт (водородный износ резко снижает срок службы цилиндропоршневой группы двигателей, тормозных накладок и барабанов, дисков сцеплений, деталей бензиновых насосов и др.).

Меры защиты от водородного изнашивания особенно актуальны и востребованы в автомобильной и авиатехнике, работающей на водородном топливе.

К химическим видам износов относят различные виды коррозии, которые развиваются в агрессивной среде при прямом соприкосновении металла с элементами последней (горячие газы, продукты переработки нефти и других органических и неорганических веществ).

Коррозия – это разрушение металла, вызываемое электрохимическим или химическим воздействием внешней среды. При этом происходит окисление, ржавление металла, изменение физико-химических характеристик поверхности и самого металла. *Химическая коррозия* обусловлена химическими реакциями без образования электрического тока. Сравнительно простым видом химической коррозии является *газовая коррозия* при высоких температурах, которая происходит в условиях воздействия на металл сухих газов.

В качестве примера можно привести окисление поверхности выпускного клапана газораспределительного механизма, поверхности камеры сгорания и стенок цилиндров двигателей.

Если химическая коррозия происходит в условиях жидкого коррозионно-активного вещества неэлектролита, она имеет название *коррозии в жидкой фазе*. Этому виду коррозии подвержены металлы в среде продуктов нефтепереработки – внутренние стенки топливного бака, поверхности подшипников коленчатого вала и др. В данных случаях коррозия является следствием воздействия на металл сернистых соединений, смол и органических кислот, находящихся в нефтепродуктах. Вызывают химическую коррозию в жидкой фазе органические окислы, которые конденсируются на поверхности трения. Среди них наиболее активными являются окислы серы. Температура точки росы серной кислоты составляет 177 °С, поэтому ее конденсация возможна в сравнительно горячей среде.

Химической коррозии подвержены клапаны газораспределительного механизма, детали цилиндропоршневой группы, головки цилиндров и др. Воздействие коррозионно-активного конденсата на стенки цилиндров двигателя продолжается и после его остановки, что особенно влияет на долговечность двигателя при продолжительных простоях автомобилей.

Важнейшей характеристикой всякого процесса коррозии является его скорость, которая определяется отношением коррозионных потерь металла к единице поверхности за определенный промежуток времени. Эта скорость часто описывается следующей экспериментальной зависимостью:

$$v = k\sqrt{t},$$

где k – константа;
 t – время.

Если, например, газовая коррозия ведет к росту толщины образующихся пленок, то это приводит к самоторможению процесса коррозии. Скорость коррозии значительно возрастает при увеличении температуры, поскольку одновременно с температурой повышается скорость диффузии.

Коррозия металлов может быть не только химической, но и *электрохимической*, когда металл соприкасается с электропроводной жидкостью. Это сопровождается переходом металла в раствор и переносом электронов с одного участка металла на другой. Электрохимическая коррозия возникает под воздействием микрогальванических элементов, которые образуются в присутствии электролита на стыках и на поверхности металлов в результате их неоднородности. Неоднородность металла вызывает разность электродных потенциалов близко расположенных участков на его поверхности. Зерна металлов обычно бывают анодами, а различные загрязнения и примеси, а также некоторые структурные составляющие сплавов становятся катодами. Так образуются многочисленные микроскопические гальванические пары. При этом анод растворяется, что ведет к электрохимическому разрушению (коррозии) металла.

Также микроскопические гальванические элементы могут возникать в результате деформирования и большого механического напряжения отдельных участков металла. На поверхности металла или сплава возникают бесчисленные микрогальванические коррозионные элементы (микропоры), генерирующие коррозионный ток, от величины которого зависит материальный эффект разрушения, вызванный коррозией.

В ряде случаев создаются условия для создания микрогальванических коррозионных элементов – макропар. Это происходит на

значительных участках металлических поверхностей. Компоненты-окислители играют роль деполяризаторов во взаимодействии коррозионных гальванических пар. Электролитом, необходимым для осуществления электрохимического процесса, является вода с растворенными в ней солями или кислотами и атмосферная вода, в которой могут присутствовать аммиак и другие примеси, которые делают ее электропроводной, то есть электролитом.

Коррозия в жидкой фазе (электролите) протекает под поверхностью электролита без присутствия кислорода воздуха. Такой коррозии подвергаются внутренние поверхности системы охлаждения двигателя.

Таким образом, электрохимическая коррозия подразделяется на атмосферную (влажную) и коррозию в жидкой фазе.

Атмосферная коррозия происходит в присутствии атмосферной влаги (дождя, снега, росы и пр.), которая оседает на поверхности металла и взаимодействует с кислородом воздуха. Атмосферной коррозии подвержены детали шасси, днища, кузова, стыки оперения, крепежные детали.

Химическая коррозия, как было показано выше, подразделяется на газовую (сухую), которая присуща выпускным клапанам газораспределительных механизмов и впускным трактам систем питания двигателей, и в жидкой фазе (неэлектролите), свойственной подшипникам коленчатых валов, внутренним поверхностям системы питания двигателей.

Известна также коррозия сероводородом. Действие сероводорода при температурах, не превышающих 250 °С, ограничивается коррозией поверхности металла, при более высоких температурах образуются сернистое железо.

В течение некоторого времени работы деталей из углеродистых сталей наблюдается ряд явлений, которые проявляются в изменениях поверхности металла и диффузии водорода через металлические стенки.

Эти явления вызваны так называемой *водородной коррозией*, то есть разъемлением при известных температурах и давлениях металла под воздействием водорода (пенетрация).

Таковы современные концептуальные взгляды на классификацию износов с учетом специфики транспортных средств.

Одна из первых классификаций видов износа была сделана шведским инженером Ю. А. Бринеллем в 1921 г. За ней последовали известные классификации В. Ф. Лоренца, А. К. Зайцева, М. М. Хрущева, И. В. Крагельского, Б. И. Костецкого и др.

Результаты исследований в области износов и их классификации нашли применение при создании стандартов.

Так, ГОСТ 1629–70 устанавливал три группы износов в машинах: механические, молекулярно-механические и коррозионно-механические. ГОСТ 23.002–78 предусматривал выделение следующих видов износов: механические, коррозионно-механические и под действием электрического тока.

Внутри отдельных видов износа также осуществляются выделение их подвидов, уточнение и дальнейшая градация. В этом направлении интересны научные разработки В. Н. Ткачева, на основе которых он выделил три основных вида разрушения поверхности детали при взаимодействии с абразивными частицами: микрорезание, многократное передеформирование, коррозионно-механическое истирание. Микрорезание имеет место, когда твердость абразивных частиц значительно выше твердости материала. Считается, что износостойкость при этом пропорциональна твердости материала.

Работы по уточнению и совершенствованию классификации износов машин продолжаются и отражают уровень научных исследований и инновационной деятельности в области триботехники и сопряженных с ней проблем научно-технического характера.

Системный анализ рассмотренных видов износа указывает на основные причины возникновения и развития процессов на поверхностях трения, а именно: механические воздействия, температура, среда и материал. На поверхностях трения чаще всего возникает несколько видов износа, один из которых является ведущим.

Своевременное и правильное определение вида износа и его проявлений, владение методами снижения интенсивности изнашивания способствуют увеличению срока службы деталей транспортных средств и повышению эффективности технической эксплуатации машин.

Следует также отметить, что все виды износов сопровождаются пластическими деформациями, наличие которых обуславливает возникновение металлических связей, увеличение химической актив-

ности, термической пластичности металла, проявление специфических явлений усталости.

3.4. Формы проявления износов деталей и их сопряжений

Форма проявления износа зависит от вида износа, так, химический износ ведет к разрушению материала деталей и обычно имеет ярко выраженный характер, что позволяет установить дефект и заменить деталь. Химический износ деталей по характеру нарастания ведет к очевидным формам проявления износа, таким как трещины, окалина, ржавчина и др., чем и устанавливается максимально допустимый износ таких деталей.

Механический износ ведет к стиранию и смятию материала, что вызывает изменение размеров деталей и нарушение первоначальных зазоров в сопряжениях. Поэтому для большинства деталей и механизмов существенен вопрос установления максимально допускаемых зазоров в сопряжениях.

Вместе с тем имеются детали, износ которых опосредуется через искажение геометрической формы и ведет к ухудшению показателей качества механизма, как это имеет место в отношении кулачков распределительного вала двигателя, зацепления шестерен агрегатов трансмиссии и др. Нарушение формы происходит одновременно с изменением размеров.

Для механического износа свойственны такие формы проявления, как увеличение зазоров в сопряжениях и искажение геометрической формы. Данные формы являются наиболее распространенными. Из этого вытекает необходимость установления:

максимального роста зазоров от заводских номинальных значений до максимально допустимых;

максимально допустимого искажения геометрической формы.

Теоретическое обоснование зазоров в сопряжениях является одной из существенных задач технической эксплуатации и конструирования транспортных средств. Примером методики решения такой задачи является установление зазора между цилиндром двигателя и поршневым кольцом, рассмотренной в трудах Ф. Н. Авдонькина.

3.5. Закономерности изменения зазоров в сопряженных деталях

Исследованиями в области теории износов выявлены следующие закономерности изменения зазоров в сопряженных деталях.

1. Износ двух сопряженных деталей увеличивает зазор от номинального значения, полученного при сборке, до значения зазора, полученного при приработке, и затем – до предельного значения зазора, соответствующего предельно допустимому износу.

2. Интенсивность износа деталей сопряжений обычно неодинакова, поэтому деталь, которая изнашивается более быстро, меняют на запасную часть, при этом восстанавливаемый зазор должен быть примерно равен номинальному зазору сопряжения.

3. При значительном износе сопряженной детали, которая не заменяется, в качестве заменяемой детали целесообразно установить деталь не с номинальным, а с ремонтным размером.

4. Интенсивность износа сопряжения деталей «бывшая в эксплуатации + новая деталь» увеличивается в результате накопления микро- и макроповреждений в незамененной детали.

5. Нарботка, ресурс запасной части до замены, как правило, меньше наработки, ресурса детали, которую она заменяет. Это происходит вследствие возрастания интенсивности износа и несовпадения ресурсов деталей.

6. Для установившегося режима эксплуатации транспортных средств, зная интенсивность износа сопряжения деталей и значения зазоров, лимитирующих возможность дальнейшей эксплуатации механизма, агрегата или транспортной машины в целом, можно прогнозировать ресурс их работоспособности L :

$$L = (z_{\text{пр}} - z_y) / (dz / dL),$$

где $z_{\text{пр}}$ – предельно допустимый зазор, мм;

z_y – установленное на данный момент значение зазора, мм;

dz / dL – интенсивность износа, мм/тыс. км пробега.

Вместо значений зазоров возможно использование идентичных им диагностических параметров.

3.6. Закономерности изменения технического состояния транспортных средств в процессе эксплуатации

Естественное изменение технического состояния транспортных средств прежде всего непосредственно связано с изменением интенсивности износа деталей и сопряжений в процессе их эксплуатации.

Естественные износы деталей и их сопряжений растут по мере увеличения времени их работы, а значит и пробегов транспортных средств. Постепенное количественное нарастание износа до известного предела не влечет за собой особых качественных изменений в работе механизма, при этом износ считается естественным и нормальным.

Перейдя указанный предел, износ уже приводит к качественным изменениям в работе механизма, резко ухудшающим его работу или делающим ее вообще невозможной. Это означает, что естественный износ перешел в аварийный.

Вся сложность профилактики неисправностей заключается в том, чтобы своевременно установить момент достижения каждым механизмом своего предельного износа и ремонтным вмешательством предупредить аварийный износ, восстановить изношенное сопряжение и, таким образом, без больших затрат вернуть транспортному средству работоспособность и присущие ему эксплуатационные качества.

Интенсивность износа зависит от множества факторов, поэтому обеспечение износостойкости механизмов и агрегатов требует разнообразных мероприятий на стадии проектирования, производства и эксплуатации транспортных средств.

Величина износа повышается на протяжении всего пробега транспортных средств, но интенсивность износа различна на различных этапах их эксплуатации.

Установлены три характерных этапа эксплуатации. Первый этап – приработка, который характеризуется постепенным уменьшением интенсивности износа, что вызвано изменением геометрии поверхностей трения и физико-механических качеств поверхностных слоев материала в начальный период эксплуатации.

Приработка обусловлена тем, что детали после сборки соприкасаются по выступам микронеровностей, так как размеры и качество поверхностей сопряженных деталей имеют некоторые отклонения. К тому же в начале трения фактическая площадь контакта в сопряженных деталях мала. В процессе приработки происходит умень-

шение работы трения, что сопровождается уменьшением температуры и интенсивности износа.

Уменьшение износа и реализация эксплуатационной надежности транспортных средств может быть достигнута работой на облегченных нагрузочных и скоростных режимах, проведением специальных видов обслуживания, применением особых марок масел и усиленной очисткой от продуктов износа пар трения.

Второму этапу эксплуатации свойственны постоянная интенсивность износа и линейная зависимость повышения износа. На протяжении этого этапа (60–600 тыс. км пробега) происходят отработка и восстановление микронеровностей поверхностей и постепенное накопление в них микроповреждений в виде изменения размеров и форм деталей.

Увеличение зазоров в результате износа ведет к ухудшению условий смазки и повышению динамических и ударных нагрузок. В результате разрушаются даже износостойкие поверхности, значительно повышается интенсивность износа и наступает третий этап – этап аварийного износа, сопровождающийся сложными, многообразными и часто неоднозначными явлениями.

В начале этого периода задаются исходными данными предельного износа, который соответствует предельному состоянию деталей транспортного средства и предельному значению зазоров в сопряженных деталях.

Это необходимо для предотвращения полного разрушения транспортных средств и избежания значительных лишних затрат. Чтобы определить этот момент оптимальным образом, необходимо знать, как и почему меняется техническое состояние транспортных средств и их элементов как на этапе установившейся эксплуатации (второй этап), так и на этапе аварийных износов (третий этап).

На рис. 3.1 показана кривая нарастания износа пары сопряженных работающих деталей, где по оси абсцисс отложен пробег транспортного средства (время работы пары), а по оси ординат – мера износа (зазор в сопряжении).

Показанная кривая справедлива для большинства удовлетворительно сконструированных подвижных сопряжений и для транспортных средств в целом, работающих в установившихся режимах. Кривая имеет три явно выраженных участка:

первый, начальный – криволинейный участок, соответствующий процессу приработки новых (или отремонтированных) сопряжений;
второй участок – промежуточный, прямолинейный, наибольшей протяженности, соответствует этапу нормальной работы транспортного средства, при котором происходят естественные износы в сопряжениях;

конечный участок также криволинейный, по виду близкий к экспоненте, описывающий третий этап – этап повышения интенсивности износа и разрушения элементов транспортного средства вследствие износов сверх допустимых пределов – аварийный износ.

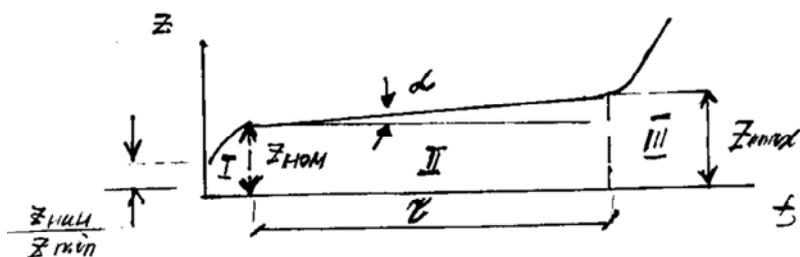


Рис. 3.1. Закономерность изменения технического состояния транспортных средств и их элементов

В таком случае межремонтный срок службы деталей сопряжения, работающего в установившемся режиме, может быть установлен по следующей зависимости:

$$L = (z_{\max} - z_{\text{ном}}) / \text{tg}\alpha, \quad (3.1)$$

где z_{\max} – предельно допустимый зазор;

$z_{\text{ном}}$ – начальный зазор приработанного сопряжения;

$\text{tg}\alpha$ – величина, характеризующая интенсивность износа сопряжения (нарастание пробега зазора в единицу времени или на 1000 км).

Согласно данной зависимости межремонтный срок службы сопряжения может быть обеспечен путем проведения мероприятий, позволяющих поддерживать в требуемых пределах величину числителя и знаменателя.

Мероприятия, направленные на поддержание определенной величины знаменателя в формуле (3.1), которые способствуют реали-

зации определенной, не превышающей заданную величину, интенсивности износа, должны быть отнесены к техническому обслуживанию. Мероприятия по поддержанию определенной величины числителя – к ремонту транспортных средств.

Величина числителя может меняться при изменении технологии обработки детали, вследствие осуществления ремонта путем применения запасной части или дополнительного ремонтного размера детали. Все эти мероприятия соответствуют восстановлению технического состояния и работоспособности сопряжения, то есть – ремонту.

Величина знаменателя зависит от качества проведения регулировочных и других операций технического обслуживания, качества применяемых смазочных и других эксплуатационных материалов и, значит, связана с мероприятиями по поддержанию необходимого уровня эксплуатационной надежности транспортных средств, их технического состояния и работоспособности. Сюда также следует отнести соблюдение правил пуска и управления транспортным средством, условиями его хранения и др.

На работоспособность подвижных сопряжений превалирующее влияние оказывают зазоры между деталями, которые имеют естественную тенденцию к увеличению по причине изнашивания деталей. Часто в сопряжения входят детали различной сложности и стоимости и с различной интенсивностью износа. В качестве примеров таких сопряжений на автомобилях можно указать на такие, как коленчатый вал и подшипники, распределительный вал и подшипники, цилиндры и поршневые кольца двигателя, тормозные барабаны и накладки колодок и т. д. В процессе эксплуатации транспортных средств на износ каждого сопряжения деталей оказывают влияние разнообразные факторы, переменные по величине и моментам начала воздействия, которые отражают и условия эксплуатации, и особенности изготовления транспортных средств и их элементов.

Проведенные многочисленные исследования природы изнашивания показывают, что на интенсивность износа влияют молекулярная структура и другие качественные свойства материалов, конструктивное совершенство и точность изготовления и обработки поверхностей, качество и чистота масел, агрессивность среды, скоростной и тепловой режим работы.

Поэтому при конкретных условиях реализации износа деталей возможны различные количественные параметры и соотношения по

рассмотренной выше закономерности в отношении длительности названных трех этапов (периодов), по количеству замен деталей, величин зазоров, а значит и ресурса деталей и других элементов транспортных средств.

Тем не менее общие закономерности процессов износа выявляют основные направления повышения ресурсов транспортных средств и эффективности их технической эксплуатации.

3.7. Закономерности изменения интенсивности износа

Интенсивность износа зависит от вида трения и множеств факторов, но в общем случае подчиняется следующей зависимости:

$$dz / ds = cp^m(1 - k \upsilon \eta l / z^2 p), \quad (3.2)$$

где dz – изменение линейных размеров детали;

ds – путь трения;

c и m – постоянные, зависящие от условий трения;

p – удельное давление;

k – коэффициент, определяющий условия гидродинамического давления в слое смазки;

υ – скорость относительного перемещения трущихся поверхностей;

η – вязкость масла;

l – линейный размер поверхности трения;

z – линейный зазор в сопряжении между трущимися поверхностями.

Составляющая зависимости $k \upsilon \eta l / z^2 p$ определяет ту часть работы, которая передается через слой смазки.

В случае сухого трения работа трения, передаваемая через слой смазки, равна нулю. Соответственно уравнение (3.2) примет вид

$$dz / ds = cp^m,$$

указывающий на то, что интенсивность износа при данных условиях зависит только от удельного давления.

Если слой смазки полностью разграничивает трущиеся детали, то работа трения и интенсивность износа будут близки к нулю.

3.8. Факторы, влияющие на интенсивность износа и пути ее снижения

Обобщая результаты исследований различных видов износа, форм их проявления, характера нарастания и причины возникновения, можно выделить основные факторы, которыми определяется интенсивность износа:

- вид трения (сухое, граничное, полужидкостное, жидкостное);
- тип и конструкция кинематической пары трения;
- качество трущихся поверхностей (химический состав, твердость, структура, шероховатость и точность обработки материалов);
- скорость относительного перемещения трущихся поверхностей;
- удельное давление на рабочие поверхности;
- физико-химические свойства среды, в которой работает пара трения;
- температура в зоне соприкосновения трущихся деталей;
- свойства и качественные показатели промежуточной среды, заключенной между взаимодействующими поверхностями (смазка, наличие продуктов износа, абразивная среда и др.);
- продолжительность взаимодействия трущихся поверхностей;
- степень совершенства технической эксплуатации, в том числе качество технических воздействий – диагностирования, технического обслуживания, ремонтов.

Интенсивность износов, надежность и работоспособность транспортных средств и их элементов определяются их назначением, конструкцией, технологией производства и условиями эксплуатации, качеством технической эксплуатации, а значит и системой технических воздействий.

Система технических воздействий как система обеспечения технически исправного состояния транспортных средств, включающая мероприятия по профилактике их отказов, основывается на соблюдении режимов технического обслуживания, то есть определенного перечня выполняемых операций, их трудоемкости и периодичности выполнения. Количество ступеней профилактики в системе (видов технических воздействий и их содержание) отражает надежность транспортных средств, условия их эксплуатации и уровень развития технической эксплуатации машин.

Для минимизации интенсивности износов, повышения работоспособности и долговечности транспортных средств необходимо реализовывать следующее:

- соблюдать режимы технического обслуживания, а также режимы обкатки новых и отремонтированных транспортных средств;
- внедрять средства и методы технической диагностики с целью избегания необоснованной разборки транспортных машин и их узлов и прогнозирования и учета ресурсов их работоспособности;
- облегчать и сокращать пусковые периоды двигателя;
- для затяжки ответственных креплений при выполнении разборочно-сборочных работ пользоваться динамометрическими ключами, при выполнении регулировки и проверки зазоров в сопряжениях пользоваться необходимыми инструментами и приспособлениями, обеспечивающими необходимую точность установления зазоров;
- обеспечить качество технологических процессов выполняемых технических воздействий;
- применять качественные эксплуатационные материалы, соответствующие марки масел с учетом времени года и технического состояния агрегата;
- не допускать резкого снижения оборотов коленчатого вала двигателя под воздействием возросшей нагрузки;
- чище и точнее производить механическую обработку восстанавливаемых деталей;
- при восстановлении деталей шире применять различные способы нанесения износостойких покрытий.

3.9. Поиски инновационных путей создания «безызносных» узлов трения машин

Явление избирательного переноса при трении

До последнего времени преобладающим направлением снижения интенсивности износа было повышение твердости трущихся поверхностей деталей. Разработано значительное количество методов повышения твердости деталей: хромирование, азотирование, цементирование и т. д. Это направление позволило в большой степени повысить надежность трущихся деталей машин и увеличить их ресурс. Постоянное стремление к уменьшению массы машин и

повышению интенсивности рабочих процессов привело к увеличению давлений в узлах машин и скоростей скольжения и ухудшило условия смазывания.

Кроме того, требования к повышению КПД механизмов, а также применение специальных смазочных материалов и жидкостей привело к тому, что традиционные методы увеличения износостойкости деталей путем повышения их твердости во многих случаях перестали быть эффективными.

В процессе поиска возможностей по уменьшению интенсивности износа деталей машин был открыт избирательный перенос при трении.

Избирательный перенос – это комплекс физико-химических явлений на контакте поверхностей при трении, который позволяет преодолеть ограниченность ресурса трущихся поверхностей машин и снизить потери на трение. Это особый вид трения, который обусловлен самопроизвольным образованием в зоне контакта неокисляющейся тонкой металлической пленки с низким сопротивлением сдвигу и не способной к наклепу, на которой формируется полимерная пленка, создающая дополнительный антифрикционный слой. Процессы, составляющие сущность избирательного переноса, разработанного А. А. Поляковым, находятся на стыках разделов химии, физической химии, физики, синергетики и механики.

Большинство физико-химических явлений избирательного переноса являются гетерогенными, поэтому их изучение затруднено, но тем не менее выявлено, что они подавляют изнашивание, снижают сопротивление сдвигу и обладают свойством самоорганизации, а иногда и способностью к обратной связи с возбуждающей причиной. Их основная ценность состоит в том, что они дифференцированно работают против факторов, ведущих к разрушению поверхности.

Традиционной схемой снижения износа и трения является самопроизвольное образование слоя смазочного материала при трении с граничной смазкой в результате адсорбции молекул смазочного материала на поверхности.

Избирательный перенос проявляет способность перестройки защитных систем, которые варьируются в зависимости от свойств среды, являющейся исходным материалом для образования системы снижения износа и трения.

Избирательный перенос применен или апробирован в машинах: самолетах, автомобилях, станках, паровых машинах, дизелях тепловозов, прессовом оборудовании и многом другом.

Избирательный перенос позволяет:

- при изготовлении машин экономить металл (15–20 %) за счет большей грузоподъемности пар трения;

- в два раза увеличить срок работы машин, в три раза сократить период приработки двигателей и редукторов (до 10 раз), а значит, сократить расход электроэнергии;

- в подшипниках качения и скольжения в два раза уменьшить расход смазочных материалов;

- повысить КПД глобоидных редукторов с 0,7 до 0,85; винтовых пар – с 0,25 до 0,5;

- за счет большей надежности контактов в два-три раза увеличить экономию драгоценных металлов в приборах.

Следует подчеркнуть, что в ряде исследований по трибологии заметно желание создать новую концепцию трения, основанную на термодинамике образования самоорганизующихся структур при необратимых процессах, что дает возможность в будущем с использованием избирательного переноса создать практически неизнашиваемые узлы трения машин.

В этих целях разработана специальная программа инновационных исследований в области водородного износа и избирательного переноса.

Литература

Основная

1. Кучур, С. С. Научные исследования и решение инженерных задач : учебное пособие / С. С. Кучур, М. М. Болбас, В. К. Ярошевич. – Минск : Адукацыя и выхаванне, 2003. – 416 с.
2. Самко, Г. А. Основы научных исследований и инновационной деятельности: методическое пособие : в 3 ч. Ч. 1 / Г. А. Самко, А. С. Сай. – Минск : БНТУ, 2014. – 72 с.
3. Трение, износ и смазка: трибология и триботехника / А. В. Чичинадзе [и др.]. – М. : Машиностроение, 2003. – 575 с.

Дополнительная

1. Авдонькин, Ф.Н. Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей: закономерности усталостного разрушения деталей в процессе эксплуатации автомобилей : учебное пособие / Ф. Н. Авдонькин. – Саратов : СПИ, 1992. – 76 с.
2. Автомобильный справочник / Б. С. Васильев [и др.]. – М. : Машиностроение, 2004. – 704 с.
3. Техническое обслуживание, ремонт и хранение автотранспортных средств : в 3 кн. Кн. 1: Теоретические основы. Технология / В. Е. Канарчук [и др.]. – Киев: Вища школа, 1991. – 360 с.
4. Технические средства диагностирования : справочник / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.

Оглавление

Введение	3
1. ТЕОРИЯ ТРЕНИЯ	4
1.1. Общие сведения	4
1.2. Виды трения	5
1.3. Теория сухого трения по Б. Н. Костецкому	9
1.4. Законы трения	10
2. ТЕОРИЯ СМАЗКИ	13
2.1. Основные положения	13
2.2. Особенности смазочных материалов и требований к ним	15
2.3. Гидродинамическая теория смазки	19
2.4. Методика создания компаундированных масел	21
2.5. Исследования смазочных материалов с учетом фактора времени	26
3. ТЕОРИЯ ИЗНОСА	29
3.1. Понятийный аппарат теории износа	29
3.2. Характеристики износа и методы их определения	29
3.3. Классификация износов	31
3.4. Формы проявления износов деталей и сопряжений	41
3.5. Закономерности изменения зазоров в сопряженных деталях	42
3.6. Закономерности изменения технического состояния транспортных средств в процессе эксплуатации	43
3.7. Закономерности изменения интенсивности износа	47
3.8. Факторы, влияющие на интенсивность износа и пути ее снижения	48
3.9. Поиски инновационных путей создания «безыносных» узлов трения машин	49
Литература	52

Учебное издание

САМКО Галина Александровна

**ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Методическое пособие
для студентов специальностей 1-37 01 06
«Техническая эксплуатация автомобилей»
и 1-37 01 07 «Автосервис»

В 3 частях

Часть 2

Редактор *Т. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 30.05.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 3,14. Уч.-изд. л. 2,45. Тираж 100. Заказ 786.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.