



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Техническая эксплуатация автомобилей»

**Г. А. Самко
П. В. Иванис**

**ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
И ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Методическое пособие

Часть 3

**Минск
БНТУ
2016**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Техническая эксплуатация автомобилей»

Г.А. Самко
П.В. Иванис

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 3

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

Минск
БНТУ
2016

УДК 378.147. 85(075.8)

ББК 74.58

С 17

Р е ц е н з е н т ы :

кафедра «Ремонт тракторов, автомобилей и сельскохозяйственных машин»
Белорусского государственного аграрного технического
университета (зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент *В. Е. Тарасенко*);
ученый секретарь БЕЛНИИТ «Транстехника», канд. техн. наук, доцент
С. Б. Соболевский

Самко, Г. А.

С 17 Основы научных исследований и инновационной деятельности:
методическое пособие для студентов специальностей 1-37 01 06
«Техническая эксплуатация автомобилей» и 1-37 01 07 «Автосер-
вис» : в 3 ч. Ч. 3. / Г. А. Самко, П. В. Иванис. – Минск : БНТУ,
2016. – 45 с.

ISBN 978-985-550-817-6 (Ч. 3).

Рассмотрены основные физико-технические направления научных исследований и инноваций с соответствующими им концепциями и теориями с учётом общих закономерностей развития и функционирования транспортной техники, а также специальные направления научной и инновационной деятельности в области трибологии по технической эксплуатации транспортных машин.

Издание предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов специальностей «Техническая эксплуатация автомобилей» и «Автосервис» и может быть полезно обучающимся по другим инженерным техническим специальностям.

Издается с 2014 г. Часть 2 (автор Г. А. Самко) выпущена в 2016 г.

УДК 378.147.85 (075.8)

ББК 74.58

ISBN 978-985-550-817-6 (Ч. 3)

ISBN 978- 985-550-048-4

© Самко Г. А., Иванис П. В., 2016

© Белорусский национальный
технический университет, 2016

Введение

Известно, что процессы изнашивания тесно связаны с деформациями. И то и другое в конечном итоге ведёт к разрушению транспортных средств и их элементов. В данной части рассматриваются процессы и явления, а также их причины и сопутствующие им и на них влияющие факторы, которые наиболее характерны для третьего этапа изменения технического состояния транспортного средства – этапа аварийного износа. Этот период интенсивного разрушения наступает после длительного периода с постоянной интенсивностью износа. Но такая закономерность отражает среднестатистические данные и для нормальных условий эксплуатации, а в каждом конкретном случае этот опасный период может произойти гораздо раньше, даже на этапе приработки.

Тем важнее знание и понимание вопросов, составляющих содержание этой части, в которой рассмотрены современные теории и концепции, объясняющие и прогнозирующие процессы разрушения транспортных машин, что необходимо для управления техническим состоянием транспортных средств путём создания оптимальных планово-предупредительных систем по поддержанию и восстановлению их работоспособности, а также для прогнозирования технического состояния транспортных средств и решения задач технической генетики в связи с расследованием аварий и их причин.

Помимо характеристик и концепций по сопротивлению разрушениям в издании рассматриваются специальные направления научной и инновационной деятельности в области трибологии транспортных машин, такие как коррозия и защита от неё, износостойкость автомобильных шин, проблемы компьютерной трибологии, значимость и актуальность которых в современных условиях и в перспективе возрастает.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ

1.1. Общие сведения

Характеристики прочности и сопротивления разрушению выбираются соответственно типу и виду нагрузок, а также режимам нагрузки (статический, динамический), конструктивным условиям (концентрация, напряжённое состояние), условиям эксплуатации (температурные условия, влажность, дорожные условия и пр.) и другим факторам.

При нормальных условиях сопротивление разрушению характеризуется пределом текучести, пределом прочности и пределом выносливости. Прочность при определённых условиях характеризуется сопротивлением пластическим деформациям или сопротивлением разрушению.

Сопротивление пластическим деформациям определяется либо началом текучести, если материал не обладает выраженным упрочнением (мягкая сталь), либо образованием пластических деформаций определённой величины.

Сопротивление разрушению при различных типах напряжённых состояний определяется условиями прочности в зависимости от возможного характера разрушения. При этом различают два основных вида разрушения:

- 1) хрупкое, протекающее без значительных пластических деформаций;
- 2) вязкое, сопровождающееся пластическими деформациями.

Один и тот же материал в зависимости от типа напряжённого состояния и условий деформирования (температуры, скорости нагрузки, агрессивности среды) может иметь хрупкое и (или) вязкое разрушение.

Сопротивление разрушению в хрупком состоянии определяется гипотезой наибольших нормальных напряжений, которая наилучшим образом соответствует хрупким материалам. Сопротивление разрушению в вязком состоянии определяется гипотезой наибольших касательных напряжений.

Состояние поверхности и упрочнение поверхностного слоя оказывают существенное влияние на прочность при действии переменных нагрузок, изменяя величину предела выносливости и концентрации

напряжений. Для характеристики этого влияния используется специальный коэффициент (отношение соответствующих пределов прочности и выносливости), на величину которого значительно влияют особенности технологии изготовления деталей, их размеры и форма.

При быстро протекающей от удара деформации возникает вязкое или хрупкое разрушение, которое имеет место в случае дорожно-транспортных происшествий и нарушения правил эксплуатации транспортных средств.

Разрушения, происходящие через различные виды деформаций, исследуются в теории деформаций.

1.2. Теория деформаций

1.2.1. Деформационно-разрушительные явления

В процессе эксплуатации транспортных средств, а также при их производстве и ремонте как они сами, так и их элементы (агрегаты, узлы, механизмы, детали) подвергаются тем или иным деформациям, среди которых выделяются две основные формы – упругие и пластические деформации.

Упругие деформации наиболее характерны для условий работы деталей двигателей, подвески транспортных средств и других составляющих ходовой части. Пластические деформации наиболее ярко проявляются в процессах обработки автомобильных деталей и как результат действия статических и динамических нагрузок.

Прочность детали заключается в её способности сопротивляться действию нагрузок, то есть сопротивляться разрушению или возникновению недопустимых упругих и пластических деформаций. Прочность детали зависит от механических свойств материала, характера напряженного состояния и других факторов.

Механические свойства определяются характеристиками сопротивления статическому разрушению (пределы прочности при растяжении, сжатии, срезе);

сопротивления:

пластическим деформациям (предел текучести);

усталостному разрушению (предел выносливости);

длительному статическому разрушению;

мгновенному разрушению (пределы текучести и прочности при скоростном деформировании), а также ударной вязкостью и твердостью.

В зависимости от механических свойств материала и типа напряжённости состояния (линейное, плоское, объёмное), его неоднородности и изменения во времени условия прочности могут определяться либо сопротивлением статическому или усталостному разрушению, либо сопротивлением пластическим деформациям.

Характер напряжённого состояния и особенности процессов разрушения зависят от действующих на деталь нагрузок.

Действующие на деталь нагрузки различают по условиям приложения и характеру изменения во времени.

По условиям приложения нагрузками могут быть:

– объёмные силы, распределённые равномерно или неравномерно по всему объёму детали; их интенсивность измеряется в килограммах на кубический сантиметр, они возникают в связи с влиянием веса, инерции масс, магнитными воздействиями;

– поверхностные силы, распределённые по поверхности: давление жидкости, газа и т. д., давление от посадок детали на деталь с натягом и др., интенсивность этих сил измеряется в килограммах на квадратный сантиметр;

– нагрузки, распределённые по весьма малым площадкам на поверхности детали, могут быть представлены в расчётах как сосредоточенные в одной точке, эти силы измеряются в килограммах.

По характеру изменения во времени различают нагрузки статические, повторно-периодические, повторно-непериодические и малой продолжительности.

Статические нагрузки нарастают постепенно и в ряде случаев длительно действуют на деталь или конструкцию, таковы, например, действие сил веса агрегатов автомобиля на раму, центробежные силы (действующие валы, оси, колёса автомобиля), силы упругости, вызванные начальной затяжкой (крепление двигателя и других агрегатов).

Статические силы могут быть постоянными (вес) и временно приложенными, например вес перевозимого транспортным средством груза. Отношение грузоподъёмности транспортного средства к его весу – одна из главных характеристик его эффективности и совершенства. И, к сожалению, наихудшие значения оно имеет на автомобильном транспорте.

Повторно-периодические нагрузки изменяются по последовательно повторяющимся одинаковым циклам. В пределах каждого

цикла нагрузка изменяется во времени по определённой кривой и характеризуется наибольшими и наименьшими значениями. Число полных циклов изменения нагрузки в единицу времени является её частотой (колебания подвески и др.).

Повторно-непериодические нагрузки многократно повторяются, причём амплитуда, период и фаза цикла меняются с течением времени, во многих случаях подчиняются статистическим закономерностям, например, загрузка самосвалов.

Нагрузки малой продолжительности за краткий промежуток времени проходят весь цикл изменения, носящий характер быстро протекающего импульса (запуск двигателя).

В зависимости от характера нагружения деформации делятся на простые и сложные, активные и пассивные.

Упругие деформации наиболее характерны для условий работы деталей подвески и иных элементов ходовой части автомобилей и других транспортных средств. Пластические деформации отчетливо проявляются в процессах обработки деталей транспортных средств и как результат действия статических и динамических нагрузок на них (транспортные средства и их элементы).

Задача технической эксплуатации транспортных средств – управление их техническим состоянием, в том числе и процессами деформирования с целью недопущения процессов разрушения транспортных средств и их элементов.

1.2.2. Теория упругих деформаций

Упругие деформации являются результатом действия одноосного нормального напряжения (растяжения и сжатия). Под действием касательных напряжений они проявляются как чистый сдвиг. Если же действуют одновременно и нормальные и касательные напряжения, то возникают пространственное напряжённое состояние и соответствующие ему деформации. Так как одновременно встречаются многие и притом различные по виду и величине напряжения, то для их определения и сравнения необходимо отыскать равнозначное простое напряжённое состояние. Для сравнения принимают одноосное нормальное напряжение. Одноосное растягивающее напряжение считается положительным; одноосное сжимающее

напряжение – отрицательным. Используется также понятие приведенных напряжений.

Основными понятиями, которыми оперирует теория упругих деформаций, являются:

временное сопротивление растяжению (сжатию), характеризующее напряжение при разрушении;

временное сопротивление изгибу при кручении, сдвиге;

их допустимые напряжения, а также критическое напряжение при продольном изгибе (важно для коленчатых валов двигателей и др.).

Широко используются такие термины, как предел упругости, текучести, абсолютное и относительное удлинение при разрыве, удельная работа деформации на разрыв и при изгибе, степень гибкости и потенциальная энергия деформации. Рассматриваются следующие типы напряжённых состояний: одноосное нормальное напряжение, чистый сдвиг, одноосное нормальное напряжение вместе со сдвигающим напряжением, трёхмерное напряжённое состояние с известными главными напряжениями.

Для их исследования и сравнения используются различные концепции, наиболее важны из них следующие:

1) теория наибольшего нормального напряжения (старейшая теория);

2) теория наибольшего удлинения и наибольшего укорочения (Mariotte, Poncelet, Grashof, Bach);

3) теория наибольших касательных напряжений (Mohr, Quest, Coulomb).

По теории наибольших касательных напряжений одноосное напряжение растяжения равнозначно равновеликому напряжению от сжатия.

По Мизесу (Mises) для границы текучести имеет место следующее соотношение:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – нормальные напряжения по трём пространственным направлениям декартовой системы координат.

Допустимые напряжения для расчётов на прочность должны быть выбраны так, чтобы не имело место разрушение различных деталей. Они зависят от рода нагрузки – временное сопротивление при статической нагрузке, то же – при переменной и колебательной.

При переменной нагрузке прочность зависит также от частоты переменной нагрузки. Местное повышение напряжения выше границы текучести не может иметь большого значения при нагрузке однократной, так как напряжение выравнивается во время течения.

При частой смене напряжений (колебательная нагрузка) даже незначительное местное повышение напряжения сильно понижает ресурс детали. Для того чтобы принять во внимание случайное повышение напряжений вследствие появления дополнительных сил, дефектов материала и пр., необходимо принимать допустимые напряжения значительно ниже тех, при которых наступает разрушение.

Запас прочности представляет отношение того напряжения, при котором наступает разрушение или состояние текучести, к выбранному допустимому напряжению.

При определении запаса прочности за основное можно принимать напряжение, или временное сопротивление, или границу текучести при растяжении и сжатии, то же – при переменной нагрузке и разрушающее напряжение при колебательной нагрузке (предел усталости). Поэтому более правильно вместе с соответствующим указанием запаса прочности приводить значения основного напряжения.

Энергия упругих деформаций

Работа внешних сил при деформации переходит во внутреннюю потенциальную энергию. Величина потенциальной энергии при упругой деформации не зависит от порядка, в котором прилагались нагрузки, но зависит от их конечной величины.

Общая потенциальная энергия W деформирования тела находится суммированием потенциальной энергии по всем элементам объёма тела:

$$W = \int dw.$$

Энергия dw в элементарном объёме dv

$$dw = W_0 dv,$$

где W_0 – потенциальная энергия элементарного объёма, отнесенная к величине этого объёма (относительная величина потенциальной энергии в рассматриваемой точке).

Упругость проявляется как свойство материала, благодаря которому после снятия нагрузки деталь восстанавливает свои первоначальную форму и размеры. При нормальных температурах, ограничениях скорости и продолжительности деформации деталь с достаточной точностью можно считать упругой до тех пор, пока возникающие в ней напряжения и деформации не превосходили определённого значения (предела упругости). При упругом состоянии имеется однозначная зависимость между нагрузкой и деформацией, формулируемая в общем виде по закону Гука: деформация пропорциональна нагрузке.

1.2.3. Теория пластических деформаций

Под **пластичностью** понимается способность материала полностью или частично сохранять получившуюся под действием внешних сил деформацию после прекращения действия этих сил. В зависимости от соотношения величин остаточной и упругой деформации, получаемого перед наступлением разрушения, материал считается пластичным или хрупким. Однако пластичность и хрупкость не могут быть отнесены только к материалу. Один и тот же материал в зависимости от характера напряжённого состояния, температуры и скорости деформирования может проявить себя как пластичный или хрупкий.

Процесс разрушения деталей может сопровождаться следующими стадиями пластических деформаций:

– начало текучести – величина пластических деформаций одного порядка с упругими деформациями;

– пластическое состояние при малых деформациях – пластические деформации велики по сравнению с упругими деформациями, но малы по сравнению с первоначальными размерами детали;

– пластические деформации при больших деформациях (технологические пластические деформации) – размеры деталей меняются значительно.

Зависимость напряжения от деформации в условиях пластичности, называемая истинной диаграммой деформирования, по своему виду аналогична кривой зависимости величины пластической деформации от времени, рассматриваемой в теории ползучести (см. п. 1.3).

Малые деформации

Деформация упругих тел в основном состоит из упругой и остающейся деформации. То состояние объекта, в котором он под действием нагрузки и без заметного ослабления связей между частицами в материале претерпевает остаточные деформации, и притом значительные, называется *пластическим состоянием*.

Пластическая деформация состоит или в изменении формы отдельных кристаллов материала, из которых образованы объекты (трансляция, двойникование кристаллов, в случае металлов и сплавов), или перемещении зёрен относительно друг друга (мягкие материалы).

При повышенной температуре наряду с перемещением атомных рядов в зёрнах кристаллов (трансляция) имеет место смещение отдельных атомов вследствие влияния температуры. Последнее является причиной «подкрадывающейся пластичности», которую металлы проявляют при повышенных температурах.

Если перед наступлением разрушения происходят только малые упругие изменения или остаточная деформация не очень велика по сравнению с упругой деформацией, то такого рода металлы и материалы относят к хрупким. Хрупкость и пластичность не являются качествами, которые при всех обстоятельствах могут быть отнесены к определённому материалу. Один и тот же материал может в случае одного напряжённого состояния вести себя как хрупкий, а при других условиях окажется способным к пластическим деформациям. Так, материал, сжимаемый только в осевом направлении, может разрушиться как хрупкий, а при всестороннем давлении может деформироваться пластически.

Скорость нарастания нагрузки и температуры имеет влияние на величину предела текучести. Так, повышение температуры облегчает

образование плоскостей скольжения в кристаллических зёрнах и способствует пластичности; очень быстро нагружаемые объекты могут разрушаться как хрупкие, в обычных условиях не являясь таковыми.

В теории упругости допускают, что существует ряд предельных состояний, при которых объекты изменяют свою форму в сильной мере и исключительно в виде остаточной деформации, то есть при этих условиях они становятся «пластичными» и начинают течь или внезапно разрушаться.

В общем виде напряжённое состояние определяется тремя главными силами упругости: σ_1 , σ_2 , σ_3 (растягивающее напряжение положительное, сжимающее – отрицательное, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$). Принимается, что если три главных напряжения увеличиваются в одном и том же отношении, то в твёрдом объекте при их определённых значениях наступает пластическое состояние или он разрушается. Переход в пластическое состояние может происходить постепенно, или он может наступить внезапно при определённом значении напряжения. В последнем случае материал имеет предел текучести (мягкое железо, алюминий после холодной обработки, медь).

Для металлов, которые имеют ясно выраженный предел текучести, пластическое состояние наступает в том случае, если сумма квадратов разностей главных напряжений равна определённому значению:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_0^2 = \text{const.}$$

Здесь постоянная σ_0 обозначает предел текучести для чистого растяжения. Из зависимости вытекают следующие закономерности:

- пределы текучести для простого растяжения и чистого сжатия равны;
- в случае сдвига

$$\sigma_1 = -\sigma_2 = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} = 0,577\sigma_0; \quad \sigma_3 = 0;$$

- всестороннее сжатие или растяжение не имеют влияния на наступление пластического состояния;

– при медленно изменяющейся нагрузке происходит процесс разрушения. Плоскости разрушения могут располагаться различно. Этим определяется характер разрушения: «разрушение разделением» или «разрушение сдвигом», что нашло отражение в теории Мора и на фигурах текучести (линиях Людерса), которые можно наблюдать на металлах, способных к удлинению, и представляющих собой следы скольжения на поверхности или в поперечном сечении объекта.

По величине деформаций различают следующие виды пластической деформации:

– начало текучести, при котором пластические деформации одного порядка величины с другими;

– пластическое состояние, когда пластические деформации уже велики по сравнению с упругой их частью, но ещё малы по отношению к поперечным размерам объекта (сильный изгиб);

– технологические пластические явления, при которых поперечные размеры объекта сильно изменяются во время деформации (развальцовка, пробивание и др.);

– деформации, сопровождающиеся заметным упрочнением (наклёпом);

– стационарное течение пластической массы, протекающее согласно следующим законам:

1. Направления главных напряжений совпадают с направлением главных удлинений.

2. Объём материала объекта практически не изменяется.

Большие деформации

При исследовании явлений пластической деформации объём тела объекта принимается неизменным. Равновесное состояние при больших деформациях описывается рядом законов, среди которых основополагающее значение имеют следующие:

1. При исследовании технологических способов обработки металла гипотеза наибольших касательных напряжений в качестве условия пластичности наиболее целесообразна. В соответствии с ней пластическая деформация наступает тогда, когда наибольшее касательное напряжение достигает своего предельного значения. При этом в направлении среднего главного напряжения не следует

ожидать какой-либо деформации в том случае, если все три главных напряжения равны по величине.

2. Деформация всегда происходит таким образом, что после достижения пластического состояния в направлении наибольшего главного напряжения материал вытесняется, благодаря чему соответствующее количество вещества вынуждено оттекать в поперечном направлении (постоянство объёма). При этом если в двух главных направлениях действуют одинаковые напряжения, то в обоих направлениях происходят одинаковые деформации. Если величины всех трёх главных напряжений различны, то поток материала в направлении среднего главного напряжения будет мал.

Сопротивление деформации

Если обработка металла происходит при температуре ниже температуры рекристаллизации, то её называют холодной обработкой. Предел сопротивления деформации при холодной обработке находится прежде всего в зависимости от величины деформации, в то время как влияние скорости деформации незначительно. Однако при скоростях деформации, которые имеют место в технологических процессах обработки деталей транспортных машин, предел сопротивления повышается на 30 % по сравнению с его статическим значением.

При обработке металла в температурных условиях выше температуры рекристаллизации (горячая обработка) необходимо учитывать имеющее место упрочнение материала.

При горячей обработке металлов становится актуальным вопрос относительно внутреннего трения и принимаются во внимание законы, подобные законам течения вязкой жидкости. В соответствии с этим существует зависимость сопротивления деформации от её скорости и температуры нагрева материала.

1.3. Теория ползучести

Теория ползучести объединяет ряд теорий, которые описывают зависимость полных или пластических деформаций в зависимости от времени при постоянном напряжении и температуре. При сравнительно небольших температурах (400–500 °С) и напряжениях

(500–1000 кг/см²) для стали эта зависимость описывается графиком, представленном на рисунке.



Зависимость деформации детали ϵ при постоянных напряжениях и температуре от времени T

Данная графическая зависимость раскрывает сущность явления ползучести материалов в стационарных рабочих режимах. Это явление пересекается с так называемым явлением Криппа, когда деформация увеличивается и происходит разрушение объекта уже после снятия всех видов нагрузок, в состоянии «покоя» и без видимых причин.

Как видно из рисунка, при нагружении нагретого образца стали деформация стремительно возрастает от нуля до некоторой величины — отрезок OA . В дальнейшем, после прекращения роста нагрузки, полная деформация нагретого образца будет постепенно увеличиваться во времени по закону, отражённому линией $ABCD$.

Тангенс угла наклона касательной к линии $ABCD$ в точке совпадения с осью абсцисс в масштабе выражает скорость деформации в определённый момент времени:

$$\dot{\epsilon} = de / dT.$$

Процесс ползучести можно разделить на три стадии (см. рисунок). В первой стадии ползучести (участок AB) скорость деформации постепенно уменьшается. В другой стадии (участок BC) процесс ползучести протекает с постоянной во времени скоростью, которая зависит от напряжения и температуры. В третьей стадии

(участок CD) скорость деформации непрерывно растёт, пока не происходит разрушение испытуемого образца (точка D).

При постоянной температуре

$$\dot{\epsilon} = R(\sigma),$$

где $R(\sigma)$ – некоторая функция напряжения.

Наиболее экспериментально проверенными зависимостями являются:

а) степенная зависимость скорости пластической деформации $\dot{\epsilon}$ от напряжения σ ;

б) закон гиперболического синуса.

Современные теории ползучести охватывают три группы теорий:

1) теории упрочнения;

2) теории старения;

3) теории текучести.

В соответствии с теориями упрочнения предполагается существование постоянной зависимости между пластической деформацией ϵ , скоростью деформации $\dot{\epsilon}$ и напряжением σ :

$$f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \sigma) = 0.$$

Согласно теориям старения существует постоянная зависимость между пластической деформацией, напряжением и временем:

$$f(\epsilon, \sigma, T) = 0.$$

В теориях течения исходят из наличия постоянной зависимости между скоростью пластической деформации $\dot{\epsilon}$, напряжением σ и временем T :

$$f(\dot{\epsilon}, \sigma, T) = 0.$$

Создание теорий ползучести связано с именами советских учёных Белова Н. М., Работнова Ю. И., Качанова Л. М. и др., а также открытием и описанием английскими и американскими учёными такого явления в металлоконструкциях, как «крип».

1.4. Зонная теория разрушения деталей

Основой процесса разрушения деталей транспортных средств являются физическая и химическая кинетика, которые позволяют построить модель процесса и найти подходы к управлению им. Кинетика разрушения деталей зависит от дефектов кристаллической решётки, диффузии, старения и усталости материалов. По современным представлениям, причиной начала процесса разрушения являются дефекты кристаллической решётки, среди которых выделяют точечные дефекты-вакансии, одномерные дислокации, двумерные поверхностные дефекты и трёхмерные дефекты – пустоты, включения и т. д.

По причине усталости деталей происходят структурные изменения их материала на субмикроскопическом и микроскопическом уровнях. Скопление дислокаций способствует возникновению микротрещин и создаёт значительные внутренние напряжения, обуславливающие переменную скорость процессов накопления повреждений и образования равновесных состояний. При тепловом движении частиц в твёрдых телах возникает процесс диффузии, выражающийся в произвольном выравнивании концентрации вещества. Считается, что при напряжениях, меньших предела упругости, происходит пластическая деформация, а разрушение материала рассматривается как постепенный кинетический теплоактивационный процесс. При деформировании твёрдого тела механическая энергия необратимо переходит в теплоту процесса внутреннего трения.

Процесс разрушения развивается в напряжённом объекте под воздействием тепловых флуктуаций как завершающий этап постепенного развития и накопления субмикроскопических разрушений. Он тесно связан с наличием и образованием вакансий и дислокаций в кристаллической решётке металла, скопление которых сначала приводит к возникновению субмикроскопических трещин, а затем – к образованию микро- и макротрещин.

1.5. Теория предельного состояния транспортных средств и их элементов

Предельное состояние транспортных средств и их элементов рассматривается в теориях износа, пластической деформации, ползуче-

сти, зонной теории и др. и является одним из основных понятий в теории разрушения. Это состояние связано с назначением сопряжений и теми отклонениями в работе агрегата, которые происходят в результате изменения состояния сопряжений, нарушения прочности детали или изменения условий трения и износа, а также вследствие возникновения аварийных обстоятельств.

Обоснование критерия предельного состояния деталей предполагает более полное использование ресурса каждого сопряжения агрегатов с целью минимизации затрат на поддержание механизмов в работоспособном состоянии. Критерий оценки предельного состояния детали из-за поломки или изменения условий трения и характеристик геометрической формы детали называют *техническим*. Например, для сопряжения «цилиндр–поршневое кольцо» изменение геометрической формы гильзы уменьшает предельную величину износа поршневого кольца. Предельное состояние долговечных деталей двигателя и других агрегатов устанавливают по экономическому критерию.

Теория предельных состояний определяет взаимосвязь между видом предельного состояния и модельным представлением соответствующих критериев предельного состояния, даёт возможность определения ряда показателей и рекомендаций по их применению.

Так, статическое разрушение, не связанное с наработкой, внезапное разрушение элемента под действием максимальных напряжений, превышающих предел прочности материала, описывается моделью предельного состояния в виде

$$\sigma_d \geq \sigma_n, \quad (1.1)$$

где σ_d – действующее напряжение;

σ_n – предел прочности.

На основе модели (1.1) рассчитывается вероятность безотказной работы элемента в течение его срока службы, то есть вероятности непревышения действующим напряжением предела прочности. Данный показатель используется для оценки надёжности корпусных деталей, зубчатых соединений, элементов подвесок и других деталей, подверженных действию максимальных статических и динамических нагрузок в экстремальных условиях эксплуатации.

В теории используется модель малоциклового усталости – зависимость от наработки накопление пластических деформаций под дей-

ствием циклических напряжений, превышающих предел пропорциональности, представляемая в виде

$$R_f + R_s > 1,$$

где R_f и R_s – соответственно меры усталостного и квазистатического повреждения.

Модель используется при оценке надёжности элементов транспортных средств, находящихся под воздействием значительных циклических нагрузок, таких как несущие детали, зубчатые соединения, элементы подвесок, роторные системы, валы и трубопроводы.

Модель многоциклового усталости – зависимое от наработки накопление усталостных повреждений под действием циклических эксплуатационных нагрузок, приводящих к постепенному разрушению элемента, описывается с помощью выражения

$$Q > G,$$

где Q – мера повреждения за наработку;

G – мера несущей способности.

Исходя из данного модельного представления, появляется возможность определить ресурс и вероятность безотказной работы элемента, которые используются при оценке надёжности элементов машин, подверженных значительному числу циклов действия ($N > 10^5$). Примерный перечень деталей: подшипники, зубчатые соединения, валы, элементы подвесок и др.

Предельное состояние по износу объединяет широкий спектр явлений, вызывающих механическое, молекулярно-механическое и коррозионно-механическое изнашивание, и в общем виде представляется как

$$h(t) > h_{\text{пр}},$$

где $h(t)$ и $h_{\text{пр}}$ – соответственно текущая фактическая и предельно допустимая величина параметров износа.

На основе модели подходят к определению средней наработки, вероятности безотказной работы элементов транспортных средств, работающих в абразивной среде и в условиях контактно-абразивного изнашивания, что используется для подшипников скольжения, валов, осей, направляющих, кулис, цепных и зубчатых

передач, поршневых колец, втулок, фрикционных, шпоночных соединений и т. д., однако при условии, что коэффициент вариации скорости изнашивания не превышает 0,3, то есть для нормального закона распределения скорости износа.

Предельное состояние по причине старения транспортных средств характеризует процессы изменения физико-механических свойств материалов во времени и в условиях относительного хранения и эксплуатации иллюстрируется выражением

$$X(t) > X_{\text{пр}},$$

где $X(t)$ и $X_{\text{пр}}$ – соответственно фактическая и предельно допустимая величина механического, электрического, теплового параметра или характеристики свойств полимера.

Расчётным параметром в данном случае является средний срок службы материала (металла, полимера, резины, диэлектрика, полупроводников) или вероятность безотказной работы за время работы элементов.

1.6. Теория усталости

1.6.1. Основные положения теории усталости

Усталость представляет собой процесс разрушения детали под воздействием многократно повторяющихся знакопеременных нагрузок. Усталостное разрушение возникает в результате приложения определённого числа циклов переменных нагрузок и соответствующих им напряжений в материале детали, превышающих его предел выносливости. Разрушение связано с возникновением усталостных трещин, развитие которых зависит от количества циклов нагружения и процессов физического старения.

Долговечность рам, рессор, картеров ведущих мостов, полуосей в основном определяется усталостной прочностью.

Статическая прочность детали не зависит от предварительного нагружения, а усталостная прочность зависит. Установление связи между усталостной прочностью и сроком службы деталей возможно только для конкретных условий эксплуатации. Это обусловлено тем, что прочность и долговечность деталей определяют по физиче-

ским нагрузкам в процессе испытания опытных образцов или по расчётным нагрузкам с учётом переменного нагружения механизмов транспортных средств. В условиях реальной эксплуатации в результате непрерывного действия переменных нагрузок возникают усталостные трещины, которые могут быть причиной усталостного разрушения.

Поэтому в процессе эксплуатации могут выделяться две группы внезапных отказов:

первая – хрупкое разрушение при напряжениях выше предела прочности детали;

вторая – отказы, имеющие место в результате постепенного необратимого накопления усталостных повреждений детали, приводящих к появлению усталостных трещин и износу.

Экспериментальными исследованиями установлено, что разрушение деталей при многократном нагружении происходит при значительно меньших напряжениях, чем при однократном нагружении, иногда даже при напряжениях, меньших величины предела упругости.

Критериями усталостного разрушения металлов являются предел выносливости (предел усталости) и долговечность.

Предел выносливости представляет собой наибольшее напряжение цикла, которое металл образца выдерживает без разрушения при неограниченном числе циклов нагружения. Наименьший предел выносливости соответствует симметричному циклу, при котором напряжения сжатия и растяжения равны по величине. Предел выносливости стали при изгибе выше, чем при кручении и растяжении-сжатии. Это происходит потому, что при кручении и растяжении-сжатии в напряженном состоянии оказывается всё сечение и, следовательно, вероятность проявления слабых мест больше, чем при изгибе.

Разрушение от усталости нередко происходит вследствие дефектов обработки поверхности детали, способствующих образованию концентраторов напряжений на границе участков ожога при шлифовании неравномерно наклёпанного слоя.

По результатам исследований, проведенных под руководством профессора Авдонькина Ф. Н., установлено, что между значениями шероховатости поверхности и пределом выносливости существует экспоненциальная зависимость. С уменьшением шероховатости поверхности уменьшается количество концентраторов напряжений, с увеличением остаточных сжимающих напряжений, интенсивности

и глубины наклёпа увеличивается выносливость стали в воздушной среде. Установлены пропорциональные зависимости предела выносливости от таких статических механических характеристик, как предел текучести, предел прочности и твёрдости. На предел выносливости оказывают влияние вид напряжённого состояния, величина и знак максимального и минимального нагружения и степень асимметрии цикла.

Для повышения выносливости необходимо сочетание переменной и статической напряжённости. У металлов в хрупком состоянии статическая составляющая напряжённости увеличивает выносливость в области статического сжатия, что широко используется в технологии поверхностного упрочнения деталей машин.

Анализ результатов исследований даёт возможность заключить, что усталостная природа разрушения одинакова для поверхностного выкрашивания и для разрушения металла при испытании круговым изгибом.

Другим критерием усталостного разрушения является долговечность, оцениваемая по числу циклов нагружения, при котором в данных условиях испытания происходит разрушение. При многократном нагружении в металле вначале накапливаются необратимые изменения, которые приводят к возникновению микроскопических трещин, затем – к их увеличению и углублению внутри детали с последующим ее хрупким разрушением.

Усталостное разрушение связано с пластической деформацией, при которой происходят взаимодействие дислокаций, скопление вакансий и зарождение усталостных трещин, чему в значительной мере способствуют адсорбция, диффузия и коррозия. При циклическом деформировании скорость протекания локальных пластических деформаций на несколько порядков выше, чем при статическом нагружении. Поэтому выше интенсивность процесса генерирования дислокаций, их движение, коагуляция и аннигиляция вакансий.

В связи с этим первую группу внезапных отказов, часто связанных с грубым нарушением условий эксплуатации транспортных средств, прогнозировать практически невозможно. Прогнозирование второй группы аварийных отказов, возникающих главным образом в результате усталостного разрушения, возможно по известной величине напряжений в рабочем сечении детали, которые могут

быть определены при диагностировании объекта, например, с помощью тензорных, сенсорных и тактильных датчиков.

Для определения расчётной величины напряжения необходимо знать нагрузочный режим при движении в различных, характерных для данного транспортного средства условиях, с учётом трогания с места, разгона и торможения, подсчитать эквивалентные напряжения, соответствующие усталости материала при определённом характере изменения нагрузок.

Частота и амплитуда нагрузок зависят от качества транспортного пути, скорости движения, мощности и типа двигателя, вибрационных параметров для конкретных условий эксплуатации транспортного средства.

Современные достижения науки в области разрушения деталей транспортных средств предоставляют возможность прогнозировать пробег до предельной величины по площади поверхностного или усталостного разрушения детали при заданной величине нагрузки (напряжения) на поверхности трения или в сечении детали, определить величину рабочей нагрузки при заданном числе цикле нагружения (пробеге) до разрушения.

1.6.2. Структурно-энергетическая теория усталости металлов

Для объяснения процесса усталостного разрушения используют аналогию между:

- а) механическими процессами поглощения энергии кристаллической решёткой при нагружении образца до разрушения;
- б) процессами при нагреве металла до расплавления.

Это положение принято за основу структурно-энергетической теории усталости металлов. В соответствии с этой теорией, явление усталости связано с развитием в локальных объёмах дислокаций до их критической плотности, при которой дальнейшее поглощение энергии кристаллической решёткой приводит к нарушению межатомных связей. Считается, что в настоящее время эта теория наиболее полно и всесторонне объясняет физику процесса усталостного разрушения. В соответствии с данной теорией выделяют три этапа усталостного разрушения.

На первом этапе в начальной стадии действия циклических напряжений в металле накапливаются упругие искажения кристаллической решётки, субмикротрещины не образуются.

Второй этап начинается при критической величине упругих искажений кристаллической решётки в некоторых частях детали, когда возникают необратимые искажения и субмикроскопические трещины, нарушаются межатомные связи.

Третий этап процесса разрушения характеризуется превращением субмикроскопических трещин в микроскопические, а затем и в макротрещины, связанные с окончательным разрушением металла.

Форма соотношения площадей зон, занятых усталостными трещинами и окончательным изломом, зависит от формы сечения элемента и условий нагружения: способа циклического нагружения, концентрации напряжений, параметров среды. Например, в деталях с концентрацией напряжений от галтели выточки трещины прорастают по направлениям, перпендикулярным к наиболее нормальным напряжениям, поверхность излома в области прорастания трещины искривляется. Это объясняется непостоянным распределением по сечению нормальных циклических напряжений в деталях с концентрациями напряжений, например, у шейки коленчатого вала двигателя в зоне расположения отверстия для смазки.

Располагая данными о распределении нагрузок и соответствующих им пробегов, можно сравнительно точно прогнозировать пробег автомобиля до отказа в результате постепенного необратимого накопления повреждений, а также определить такой режим работы, при котором вероятность образования субмикроскопических трещин мала.

1.6.3. Закономерности усталостного разрушения

Закономерности усталостного разрушения металлов и металлических сплавов тесно связаны с циклическими упругими деформациями и необратимо рассеянной энергией, с деформационными и энергетическими критериями разрушения. С позиций энергетического процесса усталостное разрушение наступает при критическом значении суммарной необратимо рассеянной энергии, величина которой равна предельной работе деформации при статическом напряжении. Согласно Авдоськину Ф.Н. аналитическая связь между

величинами суммарной рассеянной энергии и амплитудами напряжения определяется выражением

$$W_c = c(\sigma_p / \sigma_a)^4,$$

где c – постоянная;

$\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$ – амплитуда напряжения;

σ_p – сопротивление разрыву материала детали.

Механические свойства материалов описываются диаграммой статического деформирования, зависимостью деформации от приложенных напряжений, отражающей закон Гука, согласно которому большей деформации способствует большее напряжение, выдерживаемое образцом. Пределу текучести, пределу прочности и сопротивлению разрыву соответствуют идентичные деформации.

При разрушении пластическая деформация уменьшается и вязкое разрушение сменяется хрупким. При этом отмечают, что процесс разрушения замедляется при наличии следующих условий:

– по мере приближения напряжённого состояния к всестороннему нагружению;

– при понижении температуры, что связано с возрастанием сопротивления пластическим деформациям;

– при увеличении скорости деформирования (по этой же причине);

– при увеличении размера зёрен и ослаблении прочности границ кристаллической решётки материала;

– с увеличением размеров детали, так как при этом увеличивается структурная неоднородность её материала.

Процесс разрушения замедляется также при уменьшении сопротивления разрыву, что происходит вследствие деформационного старения при длительной работе металла в напряжённом состоянии в условиях повышенных температур, накопления циклических и коррозионных повреждений в процессе эксплуатации транспортных средств.

Процесс усталостного разрушения отражается на форме излома. Макроскопическая поверхность усталостного излома имеет две основные зоны:

1) образовавшуюся от циклического распространения трещин и имеющую более мелкозернистый, сглаженный характер;

2) возникшую при быстро протекающем окончательном разрушении, обычно имеющую кристаллическую крупнозернистую поверхность хрупкого излома.

Согласно критериям разрушения (их принято называть теориями прочности) разрушение тела происходит в тот момент, когда в некоторой точке определённая комбинация параметров (напряжение, деформация, температура и др.) достигает своего критического значения. При таком подходе фактически сам процесс разрушения игнорируется. В современных расчётах на прочность основным критерием является предел прочности, который принимают в зависимости от типа материала и условий эксплуатации. На самом деле процессы разрушения более сложны и многообразны. В ряде случаев в металлах под действием нагрузки и высоких температур разрушение имеет рассеянный характер, то есть во всём объеме детали на границах зёрен накапливаются поры, которые сливаются между собой и объединяются в макротрещину. Закономерности появления и развития трещин – неотъемлемая часть теории разрушения.

Управление техническим состоянием транспортных машин, в том числе и на стадии разрушения, знание его закономерностей – неперенные составляющие современной технической эксплуатации автотранспортных средств и транспортных машин.

2. КОРРОЗИЯ

2.1. Предварительная информация

По имеющимся сведениям, в России на трубопроводном транспорте ежегодно из-за коррозии теряется до 15 млн т стали [1]. Количество единиц подвижного состава автотранспортной техники измеряется миллиардами, и каждая из них в той или иной мере подвержена коррозии. Проблема очевидна.

Термин «коррозия» происходит от латинского «corrosio», что означает «разъедать», «разрушать». Под *коррозией* имеют в виду самопроизвольное разрушение металлов в результате их химического или электрохимического взаимодействия с внешней средой, вследствие чего они переходят в окисленное состояние и изменяют физико-механические свойства. Среда, в которой металл подвергается коррозии, представляет собой коррозионную или агрессивную среду. Процесс коррозии сложен, так как на него оказывает влияние множество факторов: химический состав металла, среда, в которой он находится, температура, давление и т. д.

Любой коррозионный процесс является многоэтапным. При этом необходимо:

- осуществление подвода коррозионной среды или отдельных её компонентов к поверхности металла;
- взаимодействие среды с металлом;
- полное или частичное отведение продуктов коррозии от поверхности металла (в объём жидкости, если среда жидкая).

Процессы коррозии проходят в виде межфазных реакций. Примером таких реакций является образование металлической окалины – продукта окисления в среде нагретых газов. Аналогично происходит коррозия на границе металла с водой, что характеризуется как электрохимическая коррозия.

Впервые на коррозию кузовов автомобилей как на широко распространённое явление обратили внимание в 1950-х годах. В это время самым массовым средством передвижения стали автомобили с несущими кузовами в виде моноблочных конструкций. С другой стороны, стали отчётливо проявляться и приобретать всё большую злободневность экологические проблемы. Резко возросло количество

сернистых, азотистых, канцерогенных и прочих вредных соединений в атмосфере, во всей среде обитания, особенно в городах. Применение на дорогах соли в зимнее время и специальных веществ для связывания пыли на гравийных дорогах летом создало благоприятную среду для развития коррозионных процессов в угрожающих размерах.

2.2. Об особенностях усталостной коррозии

Коррозия не только разрушает материал, но и оказывает существенное влияние на процесс усталости металлов. Поэтому необходимо принимать меры по минимизации влияния среды на усталостную прочность деталей. При воздействии поверхностно-активных и коррозионных сред в поверхностном слое детали зарождаются и развиваются трещины усталости. Одновременное воздействие на металл многократного, циклического деформирования и химически агрессивной среды обуславливает процесс коррозионной усталости. Факторами, от которых зависит этот процесс, являются:

- структура металла после термической обработки, его твёрдость и прочность;

- состояние поверхности после её упрочнения;

- продолжительность пребывания в коррозионной среде.

Коррозионная усталость оценивается величиной напряжения и числом циклов.

Значительную роль в специфике коррозионных процессов отводят адсорбции, способствующей росту числа сдвигов микрообъёмов металла и образованию микротрещин. Сочетание циклического деформирования с действием адсорбирующих поверхностно-активных веществ (ПАВ) представляет собой адсорбционную усталость. Исследования адсорбционной усталости показывают, что промышленные смазочные материалы по сравнению с воздушной средой снижают предел выносливости на 5–10 %, а в сочетании с ПАВ – до 20 %.

Известны теории, описывающие коррозионную усталость. Это электромеханическая теория Эванса и адсорбционно-электрохимическая теория Г. В. Карпенко. По теории Эванса, из-за локализации анодных процессов в местах концентрации напряжений (в порах, рисках, царапинах, скоплениях дислокаций или вакансий)

происходит развитие первичных углублений, увеличение концентрации напряжений, возникновение коррозионно-усталостных трещин. Согласно теории Карпенко В. Г. воздействие коррозионной среды на циклически деформированный металл начинается с адсорбции, приводящей к неизбежному термодинамическому изменению прочности металла, и продолжается в процессах концентрации водорода за счёт адсорбции водорода на катодных участках металла, что приводит к водородной коррозионной усталости.

Проведенные исследования коррозионной усталости выявили, что при совместном воздействии газовой среды, поверхностно-активной смазки и нагрузки трением долговечность деталей увеличивается за счёт деформационного сглаживания усталостных трещин. Положительное влияние окислительного и теплового фактора на предел выносливости обуславливается снижением шероховатости поверхности трения, упрочнением поверхностного слоя, возникновением остаточных сжимающих напряжений. Таким образом, одним из методов управления процессом усталостного разрушения является оптимизация сочетания факторов влияния: газовой среды, смазки, скорости скольжения, давления и температуры в зоне трения.

Анализ влияния коррозии на усталостную прочность деталей позволяет сделать следующие выводы:

1. В коррозионной среде концентраторы напряжений, шероховатость поверхности, прочность металла и некоторые другие характеристики не являются столь решающими, как в атмосферной среде. Для большинства углеродистых, легированных и нержавеющей сталей коррозионная среда ослабляет отрицательное влияние концентраторов напряжения, поверхностная закалка оказывает положительное влияние, поверхностный наклёп на многие стали действует отрицательно или не оказывает существенного влияния вообще.

2. При развитии коррозионной усталости предел выносливости становится условным; его величина у многих сталей в десятки раз ниже предела выносливости того же металла в нейтральной среде.

3. В процессе эксплуатации транспортных средств активная среда способствует возникновению множества трещин и вследствие местных коррозионных повреждений приводит к снижению сопротивления усталости.

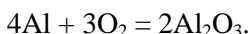
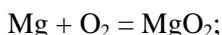
Знание закономерностей и условий возникновения и развития трещин и коррозионных повреждений позволяет не только управ-

лять процессом разрушения, но и разрабатывать эффективные методы восстановления технического состояния транспортных средств и их элементов, что имеет большое значение для профилактики отказов подвижного состава и создания и оптимизации функционирования системы технических воздействий на транспортные средства.

2.3. Сущность и классификация коррозионных процессов

По механизму образования и протекания коррозионных процессов различают химическую и электрохимическую коррозию, а также характерную для автотранспортных средств усталостную коррозию.

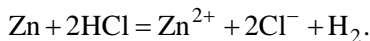
Химическая коррозия представляет собой разрушение металла вследствие его взаимодействия с окружающей средой. При таком взаимодействии на границе соприкосновения металла и среды электрохимических процессов не возникает. Химическая коррозия возникает тогда, когда металл при высокой температуре взаимодействует непосредственно с кислородом воздуха, сероводородом, водяными парами. Происходящий прямой процесс соединения металла с кислородом не прекращается после образования слоя продуктов коррозии:



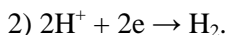
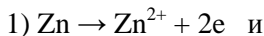
В автомобильных кузовах химическая коррозия не имеет преобладающего характера. Коррозия кузова легкового автомобиля в большинстве случаев является электрохимическим процессом.

Электрохимическая коррозия происходит в тех случаях, когда два различных материала образуют в соединении гальванический элемент; источник напряжения с положительным электродом (анодом) и отрицательным электродом (катодом). Электролитом обычно являются дождевая вода, атмосферная влага, снег. С одной стороны с электролитом граничит металл, с другой – внешний проводник, расположенный вблизи автомобиля: поверхность земли, атмосфера и пр. Электрохимическая коррозия – это взаимодействие металла с коррозионной средой, при котором ионизация атомов металла

и восстановление окислительной среды происходят поэтапно, как при взаимодействии металла с кислотами:



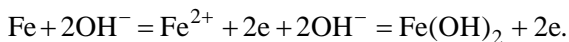
Эта суммарная реакция состоит из двух этапов:



Наибольший интерес представляет процесс коррозии железа в электролите при наличии менее активного металла. В этом случае железо, как более активный металл, является анодом, а менее активный – катодом. В гальванической паре всегда корродирует более активный металл – анод. Это обстоятельство издревле используется для защиты от коррозии корпусов морских судов за счёт применения подходящей обшивки корпуса в качестве анода.

Коррозия анода сопровождается двумя видами реакций – окислительной на аноде и восстановительной на катоде.

Реакция на аноде для железа имеет вид



Если анодная и катодная реакция объединяются, то они приводят к общей реакции коррозии:



В результате железо в сочетании с водой и менее активным металлом переходит в гидроксид железа – ржавчину.

Присутствие в воде дополнительной соли приводит к повышению проводимости электролита и, следовательно, к увеличению скорости окисления анода. При этом образуется хлорное железо.

При производстве кузовов современных автомобилей используют металлы в следующих комбинациях: сталь–медь, сталь–цинк, сталь–алюминий.

Электрохимическая коррозия наиболее характерна для кузовов автомобилей, где, как правило, создаются макро- и микрогальванические пары с определённой интенсивностью протекания электрохимических реакций.

Коррозионно-усталостные процессы ведут к повреждению металла в результате комбинированного воздействия переменных нагрузок и коррозионной среды, в результате чего образуются трещины. Выделяют следующие разновидности коррозионно-усталостных процессов:

- коррозия трещинами – коррозионное воздействие вследствие длительного окисления металла, которая появляется в зонах концентраций в металле внутренних напряжений;

- коррозия усталостными трещинами – происходящая в результате механических нагрузок при непосредственном коррозионном участии; возникающие межкристаллические и транскристаллические трещины не поддаются визуальному обнаружению;

- коррозия вибрационными трещинами, вызываемая коррозионным воздействием и высокими усталостными напряжениями вследствие вибрации металлических конструкций, с формированием и развитием усталостных трещин;

- фреттинг-коррозия (фрикционное окисление), являющаяся следствием коррозионного воздействия в сочетании с механическим трением деталей.

Коррозионная усталость часто поражает кузова автомобилей в зоне кронштейнов. Элемент жесткости чашеобразной формы кузова образует узкие щели и плоскости, которые способствуют воздействию коррозионно-активных элементов. Коррозия ослабляет конструкцию, в сочетании с ударными циклическими нагрузками, вибрацией приводит к возникновению трещин.

Рассмотрим виды коррозии по объёму и характеру коррозионного разрушения.

Общая или *сплошная* коррозия, при которой корродирует вся поверхность, подразделяется на равномерную, неравномерную и избирательную, при которой коррозионный процесс распространяется преимущественно по какой-либо структурной составляющей сплава. Характерна для автомобильных кузовов.

При *местной* коррозии корродируют определённые участки металла. Она развивается с большой скоростью на ограниченных участках поверхности, часто принимает форму направленного разрушения, приводящего к образованию сквозных отверстий или трещин. Выделяют межкристаллическую коррозию (процесс коррозии распространяется по границе металл–сплав, например, алюминий сплавляется с хромистым никелем). Бывает также в виде язв, точек и нитей.

По условиям протекания коррозионные процессы подразделяются на следующие виды:

- газовая коррозия – газовая среда при высоких температурах;
- атмосферная – коррозия металла в атмосфере;
- жидкостная – коррозия в жидких средах, как электролитах, так и в растворах не электролитов;
- подземная – коррозия металла в почве;
- структурная – коррозия из-за структурной неоднородности металла;
- микробиологическая – результат действия бактерий;
- коррозия внешним током – воздействие внешнего источника тока (анодное или катодное заземление);
- коррозия блуждающими токами – прохождение тока по не предусмотренным проектом путям;
- контактная коррозия – сопряжение разнородных электрохимических металлов в электропроводящей среде;
- коррозия под напряжением – одновременное воздействие коррозионной среды и механического напряжения;
- щелевая коррозия – природа её электрохимическая, образуется в щелях, зазорах, местах крепления деталей;
- питтинговая коррозия – образуется в местах повреждения лакокрасочного покрытия кузова;
- кавитационная коррозия – образуется под воздействием воды (днище кузова); кавитационные пузырьки вызывают гидравлические удары.

При исследовании процессов коррозии автомобиля принимаются во внимание различные условия эксплуатации: не только климатические, дорожные, агрессивность внешней среды, но и связанные с его пребыванием и состоянием – хранение (открытая стоянка, гараж), движение автомобиля.

В результате исследований коррозии автомобилей выявлены причины интенсификации развития коррозионных процессов:

длительность пребывания металлической поверхности во влажном состоянии;

относительная влажность воздуха;

температура и уровень загрязнений окружающего воздуха, особенно двуокисью серы и хлоридами.

Коррозионные процессы активизируются колебаниями и вибрацией кузова. Считается, что сочетание коррозии и колебаний является основной причиной, снижающей долговечность автомобильных кузовов. Другие же причины (старение, эрозия, износ, неравномерная нагрузка) рассматриваются как второстепенные.

2.4. Методы защиты автомобилей от коррозии

Благодаря исследованиям сущности явлений коррозии и системному анализу коррозионных процессов были созданы методы по её предотвращению и защите от неё автомобильной техники, охватывающие стадии проектирования и конструирования автомобилей, их изготовления и производства, эксплуатации и ремонта.

Одним из наиболее эффективных способов защиты от коррозии на стадии конструирования является выбор материалов, обладающих повышенной коррозионной устойчивостью, начиная с листового стали, её цинкования, алюминирования и др.

Применяется также электрохимический способ защиты от коррозии, предусматривающий возможность анодной и катодной защиты. Обычно анодом является корпус автомобиля, больше всего страдающий от коррозии. Для защиты корпуса автомобиля необходимо обеспечить его контакт с более активным металлом. По отношению к железу более активными металлами являются кадмий, хром, цинк, магний и др. Наиболее приемлемые из них – цинк и магний. Используемые в качестве анода для защиты они являются протекторами. Электроны протектора переходят в защищаемый металл и на катоде – корпусе автомобиля – начинается выделение водорода. Ионы протектора соединяются с кислородом и вызывают окислительную реакцию, приводящую к появлению гидроксидов металла протектора. Тем самым обеспечивается катод-

ная защита корпуса автомобиля до полного разрушения протектора вследствие коррозии. Например, места кузова, наиболее подвергающиеся воздействию влаги, изготавливаются из стали с одно- или двусторонним цинковым покрытием толщиной около 0,08 мм. При скорости коррозии цинка 0,02 мм/год этого покрытия может быть достаточно на протяжении четырех лет эксплуатации автомобиля.

В практике коррозионной защиты наиболее широко используются антикоррозионные покрытия. Антикоррозионные покрытия формируются в виде защитной плёнки, наносимой непосредственно на металлическую поверхность, подверженную коррозионному воздействию агрессивной среды. Защитное покрытие не должно быть пористым и электропроводным.

Антикоррозионные покрытия подразделяются на следующие группы:

– основанные на диффузионных процессах. Сюда относят:

детали с поверхностным упрочнением с использованием диффузионных процессов для термохимического цементирования, цианирования и хромирования или термическое упрочнение бором или ванадием. Металлические поверхности могут также подвергаться окислению, азотированию и сульфатированию;

детали без поверхностного упрочнения;

– воронение, применяется для получения временной коррозионной защиты металла. Металлы, содержащие двухвалентное железо, погружаются в горячий раствор гидроксида натрия;

– анодирование (ограничивается алюминием и его сплавами) – это процесс анодного окисления в электролитах, содержащих серную, хромовую или окисленную кислоту, обеспечивающий получение надёжного покрытия, которое затем стабилизируется и подвергается хромированию;

– покрытие эмалью, стеклокерамика, порошковые, синтетические и органические покрытия, каучуковые и синтетические покрытия внутренних поверхностей, металлизированные покрытия, в том числе гальванопокрытия; защитные покрытия, получаемые с помощью плазменной полимеризации, химического осаждения, погружения в горячий раствор, выпаривания, термического напыления, электропокрытия под давлением или при высокой температуре; окрашивания.

Интерес представляют также ингибиторы коррозии. Это вещества, в малых концентрациях добавляемые в коррозионную среду для абсорбции на поверхности защищаемого металла. Они позволяют резко ослабить процесс коррозии путём блокирования анодного или катодного процессов. Роль ингибиторов часто выполняют амины и амиды органических кислот. Используются также в качестве присадок к топливу, добавляются в охлаждающую жидкость для предотвращения коррозионного разрушения системы охлаждения двигателя.

Методы защиты автомобилей от коррозии более подробно и обстоятельно рассматриваются в специальных дисциплинах для студентов специальностей «Техническая эксплуатация автомобилей» и «Автосервис».

Создание новых методов защиты от коррозии и совершенствование существующих – актуальная сфера научных исследований и инновационной деятельности.

3. ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН

Факторы, вызывающие и влияющие на коррозионные процессы при эксплуатации и хранении автомобилей, особенно на открытых площадках, идентичны тем, которые наряду со временем являются катализаторами процессов физического старения, характеризующего процессы изменения физико-механических свойств материалов во времени в условиях относительно длительного хранения и эксплуатации. Среди этих факторов выделяют: свет, радиацию, атмосферные, температурные, сезонные, климатические, биологические факторы. Под действием указанных факторов, особенно тепла и света, происходит старение материалов автомобильных конструкций. Причём изменение физико-химических свойств неорганических материалов в результате воздействия окружающей среды значительно меньше, чем органических, в особенности – шин.

Среди резиновых изделий, используемых в автотранспортных средствах, основными являются шины, расходы на которые составляют значительную долю в себестоимости перевозок (до 14 %).

Износостойкость шины (как и других объектов) – это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или его интенсивности. Продукты износа шин, ввиду многочисленности автопарка и необходимости постоянного обновления комплектов шин в процессе их эксплуатации, представляют реальную экологическую опасность для окружающей среды и человека, особенно в городских условиях. Поэтому исследование путей по снижению интенсивности износа шин актуально и перспективно. В свою очередь, это исследование базируется на изучении механизма изнашивания и классификации видов износа шин.

В общем виде износ шин зависит от их конструкции (радиальные шины более износостойки и долговечны, чем диагональные), технологии их производства и качества изготовления, а также от сферы эксплуатации. К факторам сферы эксплуатации относят категорию условий эксплуатации, определяемую параметрами дороги и дорожного покрытия и интенсивностью движения.

Если среди факторов, влияющих на износ шин, выделить управляемые, частично управляемые и неуправляемые, то категории условий эксплуатации следует отнести к частично управляемым,

во всяком случае с позиций возможностей и задач технической эксплуатации автомобилей. Неуправляемыми следует считать климатические, сезонные и погодные факторы, агрессивность окружающей среды, но это не означает, что они не должны учитываться при выборе моделей шин, режиме движения на дорогах, нормировании ресурсов шин. К управляемым могут быть отнесены качество вождения автомобиля, нагрузка на автомобиль и его техническое состояние.

Экспериментальные исследования по определению износостойкости шин показывают, что наибольшее влияние на неё оказывают величина, твёрдость и химическая агрессивность абразивных частиц дороги и температура протектора. Коэффициенты влияния факторов имеют следующие значения: температура – 2,25, скорость – 1,75, давление в шинах – 1,5, сходжение и развал колёс – 1,37, нагрузка – 1,2. Помимо давления в шинах и углов установки управляемых колёс на износ шин влияют балансировка колёс, состояние подвески и ходовой части, состояние тормозной системы и др.

В процессе эксплуатации шин по мере их износа образуются и разрастаются микротрещины, что является результатом механохимических явлений, происходящих под влиянием кислорода воздуха и нагрева в зоне трения колеса с дорогой.

Резина считается классическим упругим материалом. В свете современных научных концепций износ высокоэластичных полимерных материалов является следствием механохимической, тепловой и абразивной повреждаемости.

При механохимическом износе шин выступы дорожного полотна внедряются в их поверхность. Возникающие в результате этого напряжения и деформации в зоне касания зависят от нагрузочного режима, сил трения, качественных свойств шины и дорожного покрытия.

Вследствие многократно повторяющихся воздействий частицы материала шины отделяются от её поверхности при сравнительно небольшой силе трения между шиной и сопряжённой поверхностью дороги и невысоких контактных напряжениях. Интенсивность истирания протектора составляет 0,02–0,17 мм на 1 тыс. км пробега. Число циклов отделения частиц резины зависит от сопротивления разрыву, амплитуде динамического напряжения, усталостных свойств резины.

Износостойкость резины связана с её механическими свойствами, такими как твёрдость, эластичность, модуль упругости, сопротивление разрыву, а также сопротивлением различным видам старения, химической и механохимической стойкостью. В исследованиях износостойкости учитывается изменение молекулярной структуры поверхностного слоя резины, что связывается с распадом сернистых связей и деструкцией молекулярных цепей, сопровождающихся процессами вторичного структурирования, ведущих к образованию хрупких поверхностных плёнок. Имеющие место при работе шины механические напряжения способствуют активизации процесса термомеханического распада молекулярных узлов и цепей резины.

В результате механохимического изнашивания изменяется молекулярная структура поверхностного слоя и, как следствие, ухудшаются прочностные, усталостные и другие свойства, что способствует интенсификации износа шины. Интенсивность истирания шины зависит от жёсткости и гистерезисных потерь шины, от её деформационных и эластичных свойств.

Экспериментально установлено, что в среднем после 45 тыс. км пробега шин в протекторе из резины на основе натурального каучука увеличивается густота пространственной сетки, уменьшается число полисульфидных связей, а число моно- и бисульфидных связей возрастает. Такое изменение типа молекулярных связей и структуры сетки обуславливает снижение прочностных свойств резины.

В настоящее время определены функциональные зависимости между интенсивностью износа шин и факторами влияния на износ шин.

Среди свойств надёжности автомобильных шин следует отметить уязвимость в отношении сохраняемости, чем определяется специфика их условий и правил хранения шин.

Износ шин является результатом процессов, происходящих в пятне контакта шины с дорогой. Как известно из теории колеса, на шину действуют нормальная нагрузка и касательная сила, которые в пятне контакта вызывают удельное давление и касательное напряжение, отношение их характеризует напряженность элемента шины в контакте. Если это отношение равно или превышает значение коэффициента сцепления шины с дорогой, то возникает проскальзывание, являющееся основной причиной износа протектора шины. При уменьшении давления воздуха в шинах увеличивается

напряжённость элементов протектора и возрастает предрасположенность к проскальзыванию, увеличивается сопротивление качению колёс, что приводит к увеличению износа шин. Отклонение углов установки колёс от норматива ведёт к росту касательных напряжений, вызывающих на выходе шины из пятна контакта превышение предела сцепления колеса с опорной поверхностью и, как результат, проскальзывание колёс и увеличение износа шин.

Для радиальных шин и шин с изношенным рисунком протектора касательные напряжения всегда меньше, что и обуславливает снижение интенсивности их износа. Значительное влияние на износ шины имеет также скорость движения и присутствие влаги на дорожном покрытии.

Шина считается исчерпавшей свой ресурс, если износ протектора достиг предельной величины или в покрышке возникли какие-либо повреждения – порезы, разрывы нитей корда, расслоение каркаса шины, вздутие протектора или боковины, сквозные пробои, отрывы бортов и др. Предельная остаточная высота рисунка протектора установлена:

1 мм для шин грузовых автомобилей;

2 мм – для автобусов;

1,6 мм – для легковых автомобилей.

Некоторые шины имеют специальные индикаторы износа – поперечные выступы по дну канавок протектора, высота которых равна предельной.

Снижение интенсивности износа шин и повышение их износостойкости даже на небольшой процент дают значительный экономический и экологический эффект.

4. ПРОБЛЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТРИБОЛОГИИ

Существует объективная тенденция усложнения технических объектов, в том числе транспортных средств и автомобилей в частности. Современный автомобиль – это сложная система, состоящая из функционально обособленных подсистем, открытая к возможностям дальнейшего совершенствования и «разрастания» существующих подсистем и включения в устройство автомобиля новых подсистем.

Прежде всего это связано с увеличением «удельного веса» в устройстве и конструкции автомобилей приборов и систем электрооборудования, электроники, микропроцессорной техники и компьютерных схем и систем.

В основе управления многими современными автомобилями лежат компьютерные схемы, без которых не обходится и современная диагностика автомобилей, в том числе встроенная в них.

Будучи междисциплинарными научными направлениями, компьютерология и трибология требуют применения системных моделей, информационных систем по разным разделам трибологии, трансляторов, соединяющих эти разделы, экспертных систем для проектирования и диагностики.

Существует необходимость более эффективного использования информации, получаемой при исследовании трибологических процессов. Диагностические системы в значительной мере сами базируются на слиянии компьютерных технологий и знании закономерностей и механизмов трибологических процессов.

Компьютеры позволяют производить моделирование трибологических процессов различной сложности. Модель сложной трибосистемы также способствует использованию специфического компьютерного мышления, так как сама по себе является, как правило, программным комплексом. Опыт создания моделей сложных трибосистем позволил сделать ряд выводов, выявить недостатки и сформулировать направления дальнейшего развития.

Своё дальнейшее развитие получила компьютерная технология проектирования узлов трения. На этапе анализа здесь предлагается использовать интерпретаторы – экспертные системы. На этапе синтеза используют гибридные экспертные системы, которые содержат модели работы узла, базы знаний по данным разделам и систему правил. Фактически требуется продолжить работу по информаци-

онным системам в области трибологии на новом уровне развития аппаратных, программных средств и систем коммуникации с учётом имеющегося опыта и проделанной работы специалистов.

Большое значение в трибологии имеет также теледиагностика, причём здесь задачей компьютерной трибологии является содержательная часть создания системы.

Компьютеры рассматриваются как неотъемлемая часть системы экспериментальных трибологических исследований в современных испытательных установках. Задача компьютеров состоит в контроле и управлении режимом эксперимента, регистрации измеряемых параметров, обработке результатов.

Задачей, относящейся к области компьютерной трибологии, является поиск режимов, при которых реализуются заданные свойства трибосистемы, что достигается встраиванием в управление испытательной системой программы моделирования исследуемого процесса.

При моделировании, в компьютерном эксперименте, в системах диагностики и мониторинга имеется общая проблема интерпретации результатов. Компьютерная визуализация информации позволяет интенсифицировать процесс познания, исследования, подключить интуитивные способности исследователя. Это достигается с помощью специальных средств компьютерной графики. Применение технологии виртуально-интуитивного извлечения информации позволяет при моделировании и эксперименте более эффективно выявлять новые трибологические эффекты и явления.

Сами компьютеры также являются объектами исследований в трибологии и связанной с ней диагностикой. Как объект диагностирования компьютер имеет иерархическую модульную конструкцию: вычислительный комплекс и тракты обмена информацией, совокупность устройств, стойку, раму, сенсорную панель, типовые элементы замены, интегральные и микропроцессорные схемы, радиоэлементы.

К компьютерной технике применяются следующие виды диагностирования:

тестовое и функциональное; динамическое, статическое, параметрическое; со штатными и дополнительными контрольными точками; с временной заменой блоков (эмуляцией) на время проверок; внешнее и внутреннее (само диагностирование);

с преобразованием структуры объекта и без преобразования; постоянное и периодическое; поэлементное и общее, детерминированное и вероятностное.

Среди технических средств диагностирования выделяют аппаратные, программные и комбинированные.

Безусловно, компьютерная техника – специфический и перспективный объект трибологических исследований (коррозия, износы, вибрации, перегрузки, старение, усталостные явления и т. д.), а также инновационной деятельности в области современной автомобильной и иной транспортной техники, так как компьютерные системы и технологии – неотъемлемая часть их устройства и средств диагностирования.

Литература

1. Единая транспортная система / под ред. В. Г. Галабурда. – М.: Транспорт, 2001. – 304 с.
2. Техническое обслуживание, ремонт и хранение автотранспортных средств : в 3 кн. / В. Е. Канарчук [и др.]. – Киев : Вища школа, 1991. – Кн. 1 : Теоретические основы. Технология. – 360 с.
3. Технические средства диагностирования: справочник / под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1989. – 672 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ....	4
1.1. Общие сведения.....	4
1.2. Теория деформаций.....	5
1.2.1. Деформационно-разрушительные явления	5
1.2.2. Теория упругих деформаций	7
1.3. Теория ползучести.....	14
1.4. Зонная теория разрушения деталей	17
1.5. Теория предельного состояния транспортных средств и их элементов	17
1.6. Теория усталости.....	20
1.6.1. Основные положения теории усталости.....	20
1.6.2. Структурно-энергетическая теория усталости металлов	23
1.6.3. Закономерности усталостного разрушения.....	24
2. КОРРОЗИЯ.....	27
2.1. Предварительная информация	27
2.2. Об особенностях усталостной коррозии	28
2.3. Сущность и классификация коррозионных процессов.....	30
2.4. Методы защиты автомобилей от коррозии	34
3. ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН.....	37
4. ПРОБЛЕМЫ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТРИБОЛОГИИ	41
ЛИТЕРАТУРА	44

Учебное издание

САМКО Галина Александровна
ИВАНИС Павел Владимирович

**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 3

Редактор *М. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *Ю. С. Кругловой*

Подписано в печать 10.10.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,67. Уч.-изд. л. 2,09. Тираж 100. Заказ 344.

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.