

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра лесных машин и технологии лесозаготовок

ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ ДЛЯ МАШИН ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА

**Методические указания
по дисциплине «Сервисное обслуживание
и техническая эксплуатация лесопромышленного оборудования»
для студентов специальностей 1-36 05 01 «Машины
и оборудование лесного комплекса»,
1-46 01 01 «Лесоинженерное дело»**

Минск 2011

УДК 630*37(075)
ББК 43.904я75
П 37

Рассмотрено и рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом университета.

Составители:

В. А. Симанович, В. А. Демидов, С. Е. Арико

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры
деревообрабатывающих станков и инструментов БГТУ

Н. В. Бурносков

По тематическому плану изданий учебно-методической литературы университета на 2011 год. Поз. 20.

Для студентов специальностей 1-36 05 01 «Машины и оборудование лесного комплекса», 1-46 01 01 «Лесоинженерное дело».

© УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2011

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение производительности труда при снижении себестоимости продукции невозможно без оснащения предприятий лесного комплекса современной техникой. На предприятия поступают высокопроизводительные, сложные по устройству одно- и многооперационные лесозаготовительные машины, лесовозные автомобили, прицепы и полуприцепы, оснащенные гидроманипуляторами, дорожно-строительные машины.

Современные машины и механизмы предъявляют высокие требования к качеству топливо-смазочных материалов. Это обусловлено тем, что эксплуатация лесной техники осуществляется в тяжелых условиях, в которых узлы и агрегаты испытывают увеличенные удельные нагрузки. Правильный выбор и применение топлива, моторных и трансмиссионных масел, специальных жидкостей и пластичных смазок оказывает значительное влияние на надежность, долговечность, экономичность и другие показатели эффективности применения машин и механизмов.

Для уменьшения трения и интенсивности износа трущиеся поверхности смазывают. В зависимости от конструкции узла и агрегата, рабочих скоростей, удельных нагрузок на трущиеся поверхности и температурных условий, в которых работает сопряженная пара, агрегат или весь механизм, применяют тот или иной вид смазочного материала.

Рациональное применение смазочных материалов значительно повышает эффективность работы машины и механизмов в эксплуатационных условиях.

Под рациональным применением имеется в виду:

- а) правильно подобранный ассортимент пластичных смазок, соответствующий условиям работы узла трения;
- б) технически обоснованный расход смазочных материалов;
- в) правильно установленный режим смазывания.

Ассортимент, расход смазочных материалов и режим смазывания определяются конструктивными особенностями и заданным режимом работы узла трения и механизма в целом, а также условиями эксплуатации.

Опыт эксплуатации машин и механизмов различного назначения показывает, что при недостатке смазки в узлах трения повышается износ деталей ввиду нарушения нормальной работы машины, а при

избытке – снижается эффективность эксплуатации механизмов из-за загрязнения их шламом, образующимся в увеличенном количестве при отработывании смазочных материалов.

Пластичные смазки (именуемые в дальнейшем «смазки») наряду с жидкими маслами являются важными эксплуатационными материалами. Их особенность состоит в присущей пластичности, т.е. способности сохранять неизменной свою форму и не деформироваться под действием небольших нагрузок (собственный вес и т.п.). В то же время под действием определенных усилий смазки деформируются (текут) подобно вязкой жидкости – смазочному маслу.

Смазки защищают металлические детали и механизмы от коррозии. Хорошие защитные свойства и особенности механических свойств позволили применять их в качестве консервационных (защитных) материалов. Как правило, по защитным характеристикам смазки превосходят жидкие масла. Защитные смазки применяются для консервации металлоизделий и машин при транспортировании и длительном хранении. Некоторые смазки обладают хорошими герметизирующими и уплотнительными свойствами, в особых случаях выполняют роль изоляционных или токопроводящих материалов, обеспечивают работу узлов трения в условиях радиации, глубокого вакуума. Новые сорта высококачественных пластичных смазок рассчитаны на обеспечение эффективной эксплуатации современных лесных машин. Применение таких смазок позволяет увеличить ресурс машин и сократить их расход.

В себестоимости продукции лесопромышленного предприятия затраты на техническое обслуживание (ТО) и ремонт машин, механизмов и оборудования занимают большой удельный вес. Значительная доля работы при ТО приходится на смазочные операции. Поэтому снижение трудоемкости ТО – важный резерв повышения экономической эффективности эксплуатации лесных машин.

Для рационального использования пластичных смазок недостаточно знать только паспортные данные – нужно учитывать весь спектр их функциональных свойств, взаимодействие системы «узел – смазка».

Таким образом, от качества, правильного выбора и умелого применения пластичных смазок зависит не только расход, но и техническая исправность и срок службы лесных машин, а также затраты труда и средств на ТО и ремонт машин. Изучению этих вопросов должно быть уделено большое внимание при подготовке инженерных кадров для предприятий лесного комплекса.

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОК

Повышение надежности лесных машин является одним из основных направлений развития современной автотракторной техники. Увеличение скоростей движения и грузоподъемности, снижение металлоемкости лесотранспортных и лесозаготовительных машин сопровождается, как правило, уменьшением габаритов узлов и ужесточением режимов работы смазочных материалов.

От узлов и агрегатов лесных машин требуется длительная эксплуатация без обслуживания, в том числе без пополнения узлов трения смазочными материалами. Это связано с тем, что значительная часть работ по техническому обслуживанию (ТО) машин приходится на смазочные операции. Доля смазочных работ в суммарных затратах составляет ~ 14–27% при ТО-1 и 13–29% при ТО-2. В условиях реальной эксплуатации лесных машин диапазон колебаний уровня затрат значительно шире.

Увеличение сроков смены смазки, за счет применения высококачественных смазок, позволяет понизить не только расходы на ТО машин, но и затраты труда в сфере производства смазок, а также уменьшить объем их потребления и производства.

Внедрение закрытых подшипников и герметизированных узлов позволяет сократить число точек смазки, а применение высококачественных смазок – увеличить интервал между смазочными операциями в 3 и более раз. На лесных машинах доля герметизированных узлов, не требующих дозаправки смазкой в процессе эксплуатации, всегда была и, вероятно, еще долго будет значительно ниже, чем на легковых автомобилях.

Существование пластичных смазок на сегодняшний день обуславливается тем, что не все узлы, детали, агрегаты можно смазать маслом по причине их конструктивных особенностей.

Пластичные смазки используют для уменьшения трения и износа узлов, в которых нецелесообразно (невозможно) создать принудительную циркуляцию масла, либо масло не удерживается, либо невозможно обеспечить непрерывное пополнение его запаса. Легко проникая в зону контакта трущихся деталей, смазка удерживается на трущихся поверхностях, не стекая с них, как это происходит с маслом.

Благодаря антифрикционным свойствам смазки существенно уменьшают энергетические «затраты» на трение, что позволяет снизить потери мощности машин и механизмов на перемещение. Чаще всего антифрикционные смазки используются в подшипниках качения, шарнирных соединениях, тихоходных шестеренчатых и червячных передачах (в лебедках, редукторах).

Наряду с этим пластичные смазки выполняют другие функции. Они препятствуют проникновению к поверхностям трения агрессивных жидкостей, газов и паров, а также абразивных частиц (пыли, грязи и т.п.). Почти все смазки выполняют защитные функции, предотвращая коррозию металлических поверхностей. Производят также рабоче-консервационные смазки, которые не заменяют перед началом эксплуатации техники на антифрикционные.

Для герметизации зазоров в механизмах и оборудовании, а также соединений трубопроводов и запорной аппаратуры применяют уплотнительные смазки.

К смазкам специального назначения предъявляют особые требования. Например, они должны увеличивать коэффициент трения, выполнять роль изоляционных или токопроводящих материалов, обеспечивать работу узлов трения в условиях радиации, глубокого вакуума и т.п. Однако смазки по сравнению с маслами имеют ряд недостатков: они удерживают в себе продукты механического, коррозионного износа деталей и продукты старения (разрушения) самой смазки; в сравнении с маслом хуже отводят тепло от смазываемых деталей трения.

К основным объектам и условиям применения смазок следует отнести: открытые и негерметизированные узлы трения; труднодоступные узлы трения; механизмы, расположенные под переменным углом к горизонту; узлы трения, где невозможна частая замена смазочного материала; переменный скоростной режим эксплуатации машин; вынужденный контакт узла трения или защищаемой поверхности с водой либо агрессивными средами; условия резко изменяющегося температурного режима; герметизация подвижных уплотнений, сальников и резьбовых соединений; длительная консервация машин, оборудования, приборов и металлических изделий; необходимость упростить конструкцию, уменьшить массу и размер смазываемых устройств.

Для консервации применяют 14% производимых пластичных смазок, для герметизации – 2%. Остальные смазки используют в качестве антифрикционных смазочных материалов для уменьшения трения и износа деталей.

2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ, СМАЗЫВАЕМЫХ ПЛАСТИЧНЫМИ СМАЗКАМИ

Пластичные смазки применяют в самых различных узлах автомобилей и тракторов, работающих в условиях трения качения и скольжения. Это подшипники ступиц колес, шаровые и карданные шарниры и т.д. Эксплуатация каждого узла имеет свои особенности, которыми определяются специфические требования к смазочному материалу.

Рассмотрим конструктивные особенности и режимы работы некоторых узлов трения автомобилей и тракторов, смазываемых пластичными смазками.

Подшипники ступиц колес. Наибольшее количество подшипников качения, смазываемых пластичными смазками, применяется в ступицах колес. На их долю приходится до 40%, а на долю агрегатов двигателя и вспомогательного оборудования только 15% от общего числа подшипников, используемых на автомобилях. Остальные подшипники устанавливаются в агрегатах трансмиссии и смазываются маслами.

Долговечность смазок в подшипниках ступиц колес в значительной степени зависит от условий эксплуатации и, прежде всего, от температурного режима узла и наличия ударных и вибрационных нагрузок. Динамические нагрузки на подшипники ступиц колес достаточно велики, но не они являются определяющими при подборе пластичных смазок, так как все антифрикционные смазки достаточно хорошо им противостоят. Более важную роль играет рабочая температура, которая зависит от типа машины, конструкции тормозов, условий эксплуатации, регулировки подшипников и т.д.

Современные автомобили характеризуются высокими динамическими показателями. Они оборудуются высокоэффективными дисковыми тормозами, которые являются мощными источниками тепла. Так, температура подшипников ступиц колес автомобилей с колодочными тормозами обычно превышает температуру окружающей среды на 20–50°C, т.е. достигает 40–90°C, и только в тяжелых условиях работы иногда превышает 100°C, а на автомобилях с дисковыми тормозами температура постоянно выше 100°C и часто достигает 150°C [1].

Большой нагрев деталей дискового тормоза и ступицы колеса, расположенной в непосредственной близости от него, по сравнению с нагревом деталей колодочного тормоза, объясняется значительно меньшей рабочей поверхностью торможения в паре «диск – колодка», чем в паре «колодка – барабан».

Применение тормоза такого типа значительно расширяет эксплуатационные возможности автомобиля, но ужесточает условия работы смазок в подшипниках ступиц колес главным образом из-за нагрева их до высоких температур. Этот факт свидетельствует о необходимости, с одной стороны, применения более качественных антифрикционных смазок (с улучшенными противоизносными свойствами и стабильностью), а с другой стороны – необходимости увеличения надежности подшипниковых узлов.

Недостаточная эффективность смазок при работе в ступицах колес в наиболее тяжелых случаях проявляется в вытекании их из узла вследствие недостаточной устойчивости к температурному и механическому воздействию или приводит к высыханию смазки. Результатом в обоих случаях является преждевременный выход подшипников из строя. Наиболее типичными причинами выхода из строя подшипников ступиц при нормальной работе является выкрашивание дорожек качения, роликов или шариков, реже наблюдаются сколы роликов из-за ударных нагрузок. Хотя контактные напряжения на телах качения роликовых и шариковых подшипников невелики и редко превышают 450–550 МПа, они сильно зависят от предварительного натяга и от его уменьшения в процессе эксплуатации из-за износа цапф и элементов подвески.

Шаровые шарниры управления и подвески. Шаровые шарниры, устанавливаемые в передней подвеске автомобиля, обеспечивают перемещение передних колес в вертикальной плоскости, вызываемое неровностями дороги, а также поворот колес при вращении рулевого колеса. Повышенный износ поверхностей трения шаровых шарниров опасен, так как приводит к увеличению люфта рулевого колеса, что затрудняет или даже делает невозможным управление автомобилем. Затвердевание смазки вследствие старения или замерзания приводит к увеличению крутящего момента, прикладываемого к рулевому колесу при изменении направления движения автомобиля.

Конструктивно [2] шаровые шарниры могут выполняться как разборными, так и неразборными, с регулируемым и нерегулируемым люфтом (рис. 2.1).

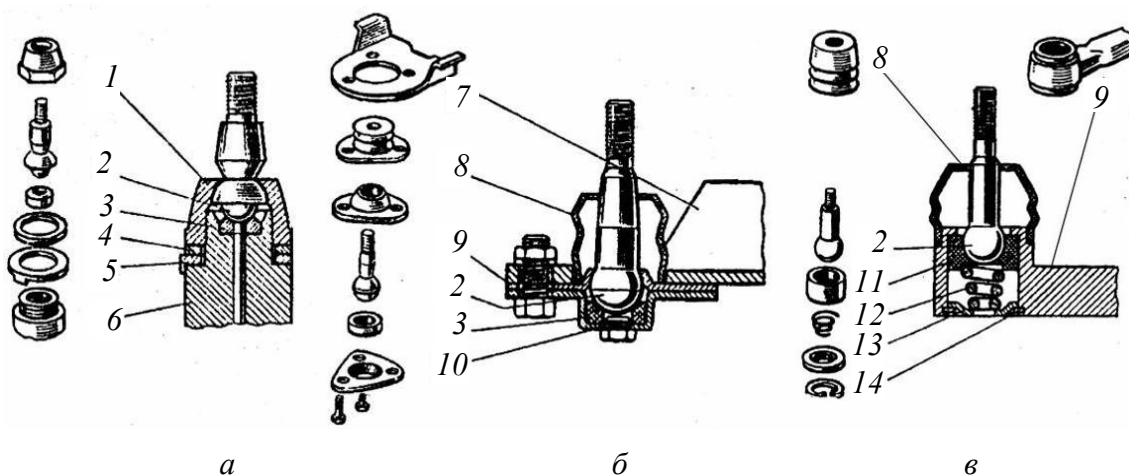


Рис. 2.1. Типы шаровых шарниров:

а – разборный, люфт устраняется затяжкой гайки 1; *б* – разборный, люфт устраняется сменой вкладыша 3; *в* – герметичный неразборный шарнир;
 1 – гайка; 2 – палец; 3 – вкладыш; 4 – прокладка; 5 – шайба; 6 – корпус; 7 – рычаг;
 8 – чехол; 9, 10 – верхняя и нижняя крышки; 11 – обойма; 12 – пружина;
 13 – упорная шайба; 14 – стопорное кольцо

Анализ условий работы шаровых шарниров и поворотных кулаков автомобилей показал, что подшипники скольжения этого типа работают в режиме возвратно-поступательного движения со скоростью соответственно 0,2 и 0,002–0,007 м/с. Контактные напряжения на шаровых шарнирах легковых автомобилей достигают приблизительно 50 МПа, грузовых – 200 МПа, а в поворотных кулаках – 15–20 МПа. Максимальные температуры в этих узлах не превышают 50°C и в основном близки к температуре окружающего воздуха. Основные причины преждевременного выхода из строя этих узлов – абразивный износ, усталостное выкрашивание и задиры поверхностей трения. Интенсивность абразивного износа может достигать 0,02–0,03 мм·10⁻⁴ км [3].

Карданная передача и шарниры. Карданная передача предназначена для передачи крутящего момента между механизмами, валы которых несоосны или изменяют свое относительное расположение при движении автомобиля.

Устанавливают карданные передачи между коробкой передач и ведущим мостом автомобиля, а также в ряде других случаев между коробкой передач и раздаточной коробкой, раздаточной коробкой и ведущими мостами, главной передачей и ведущими колесами, сцеплением и коробкой передач, в приводе систем управления вспомогательного и специального оборудования.

Условия работы карданных передач определяются главным образом положением их валов: чем больше угол между валами, тем в более тяжелых условиях работает передача. Так, угол между валами карданных передач ведущих управляемых колес автомобиля изменяется при их повороте и составляет до 40° . В карданных передачах, обеспечивающих привод поддрессоренных узлов (ведущих мостов и неуправляемых колес автомобиля при независимой подвеске), переменный угол между валами достигает 20° .

Вследствие деформации упругого элемента подвески при движении автомобиля расстояние между поддрессоренными и неподдрессоренными узлами изменяется, и это делает необходимым применение в передаче подвижных шлицевых соединений, которые допускают линейное перемещение карданных шарниров. В карданных передачах, связывающих узлы, установленных непосредственно на раме машины, угол между валами составляет до 5° , что является в основном результатом неточности монтажа, деформации рамы и картера во время движения машины. В наиболее благоприятных условиях работает карданная передача вспомогательных механизмов (угол между валами постоянный и не превышает 20°).

Карданные передачи должны обеспечивать равномерную и синхронную передачу крутящего момента между узлами, высокий КПД, минимальные динамические нагрузки, бесшумность в работе, простоту обслуживания.

Конструкция карданных передач. Основные элементы карданной передачи: карданные шарниры, обеспечивающие передачу крутящего момента при изменении угла между валами, карданные валы, соединительные фланцы, промежуточные опоры, подвижные соединения, защитные кожухи.

На рис. 2.2 представлены схемы карданных передач автомобилей с колесной формулой 4×2 , 4×4 и 6×6 , в которых шарниры с крестовиной обеспечивают равномерное вращение валов.

В длиннобазных автомобилях 4×2 предпочтительнее осуществлять передачу, показанную на рис. 2.2, а. Она четырехшарнирная с двумя карданными валами и промежуточной опорой, что позволяет уменьшить длину валов и таким образом повысить их жесткость.

Привод мостов лесовозных тягачей 4×4 осуществляется тремя двойными карданными передачами, выполненными по схеме, показанной на рис. 2.2, б.

На рис. 2.2, в представлена схема полностью разделенного привода ведущих мостов автомобиля 6×6. Если автомобиль 6×6 имеет средний проходной мост, карданная передача упрощается (рис. 2.2, г).

На рис. 2.2, д, е даны схемы приводов ведущих управляемых колес автомобиля при мостовой (зависимой) и независимой подвесках: первый – привод колес карданной передачей с одним шарниром равных угловых скоростей, второй – с двумя шарнирами неравных и одним шарниром равных угловых скоростей.

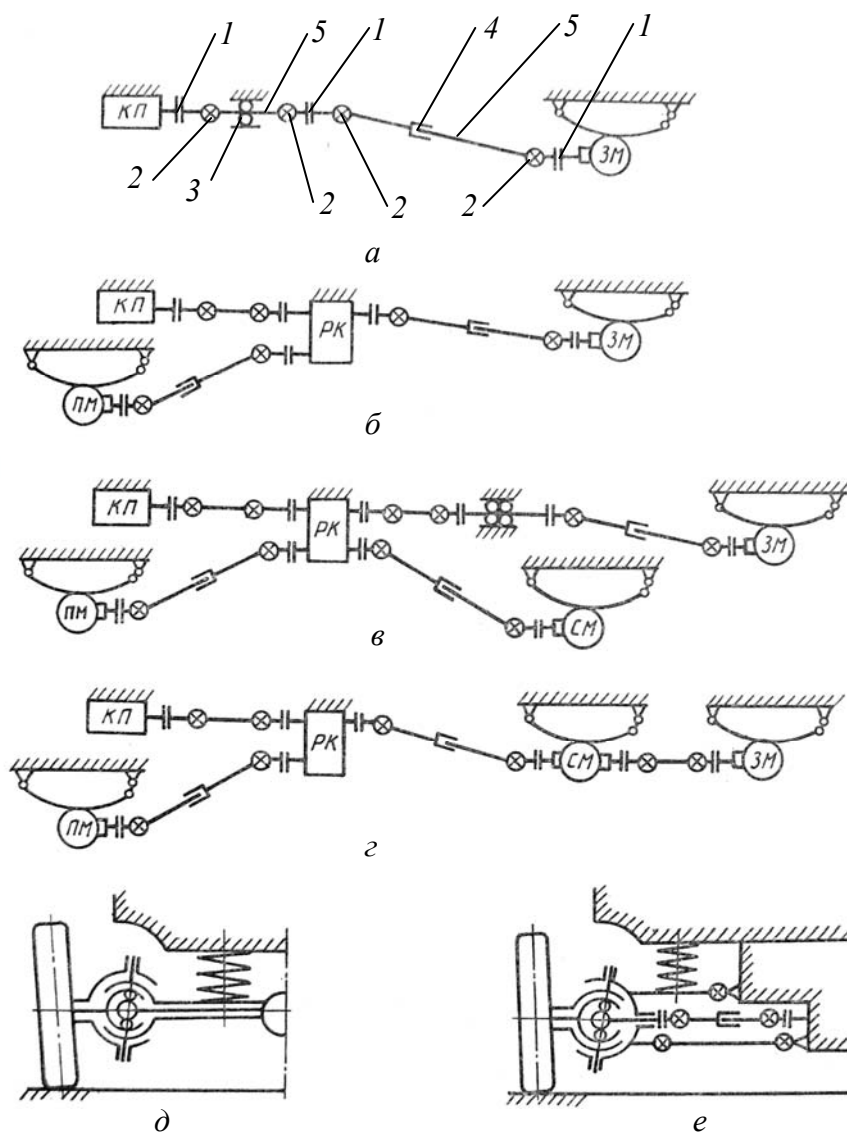


Рис. 2.2. Схемы карданных передач:

КП – коробка передач; РК – раздаточная коробка; ЗМ – задний мост;
 СМ – средний мост; ПМ – передний мост; 1 – фланец присоединительный;
 2 – шарнир карданный; 3 – опора промежуточная; 4 – соединение шлицевое;
 5 – вал карданный

Основным элементом передачи является карданный шарнир, на долю которого в зависимости от типа автомобиля и условий эксплуатации приходится 67–91% отказов узла. Карданные шарниры обеспечивают передачу крутящего момента между валами, оси которых пересекаются под углом. Различают карданные шарниры равных и неравных угловых скоростей. Карданные шарниры неравных угловых скоростей делят на упругие и жесткие. Карданные шарниры равных угловых скоростей по конструкции бывают шариковые с делительными канавками, шариковые с делительным рычажком, кулачковые и сдвоенные.

Упругие карданные шарниры, или карданные муфты, применяют в передачах, где угол между валами составляет до 5° . Компенсация перекосов валов обеспечивается либо за счет выбора зазоров между деталями, либо за счет деформации упругого элемента, связывающего ведущий и ведомый элементы шарнира. В *зубчатом* (рис. 2.3) и *кулачковом* (рис. 2.4) указанные перекосы компенсируются за счет деформации упругого элемента (металлических пластин, резиновых колец или резинометаллических втулок).

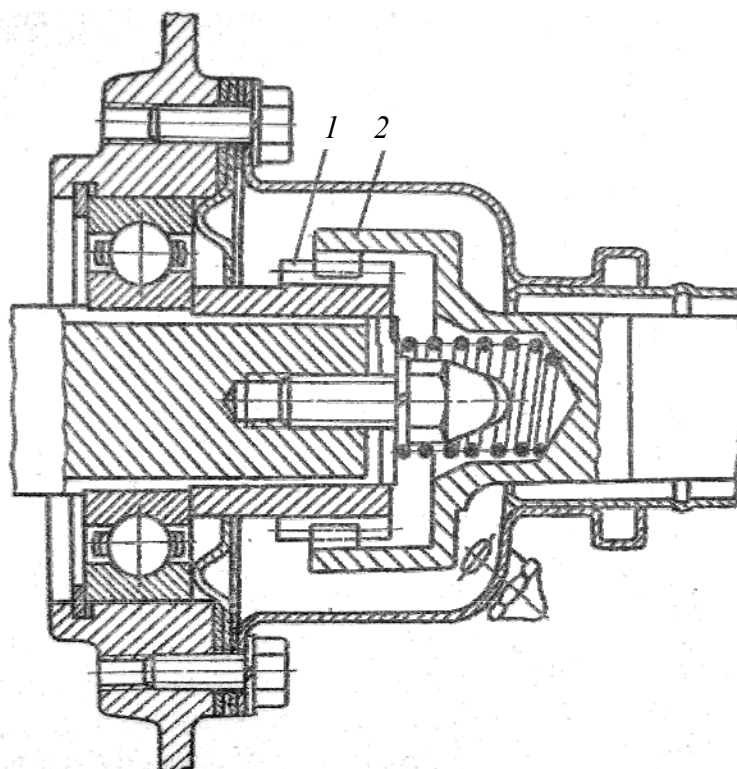


Рис. 2.3. Зубчатый карданный шарнир:
1 – зубчатый венец вала; 2 – муфта

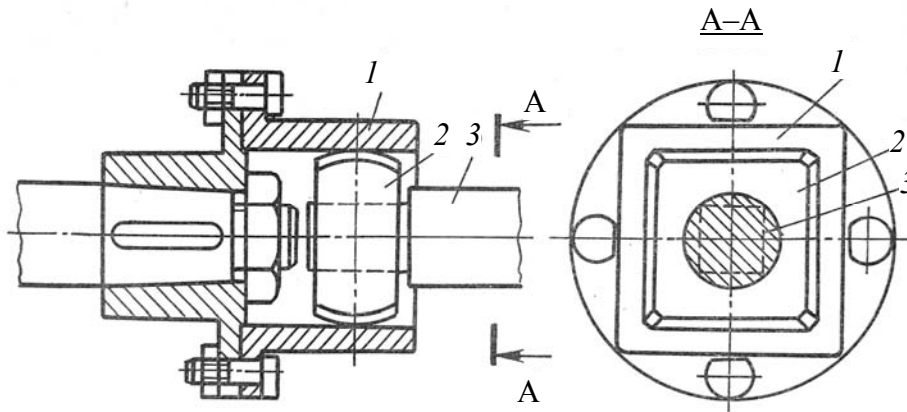


Рис. 2.4. Кулачковый карданный шарнир:
1 – обойма; 2 – сухарь; 3 – вал

В трансмиссиях тракторов и автомобилей находят применение *упругие карданные муфты*, в которых в качестве упругого элемента использованы резиновые втулки. Втулки 1 (рис. 2.5) монтируют с предварительным натягом в гнезда штампованной стальной обоймы 2, их половинки стягивают болтами 3. При упругих карданных муфтах допускается осевое смещение валов. Поэтому в такой карданной передаче могут отсутствовать компенсирующие шлицевые соединения, что повышает надежность работы передачи. Кроме того, упругие элементы муфты выполняют функции дополнительного гасителя крутильных колебаний в трансмиссии из-за наличия в упругом элементе внутреннего трения.

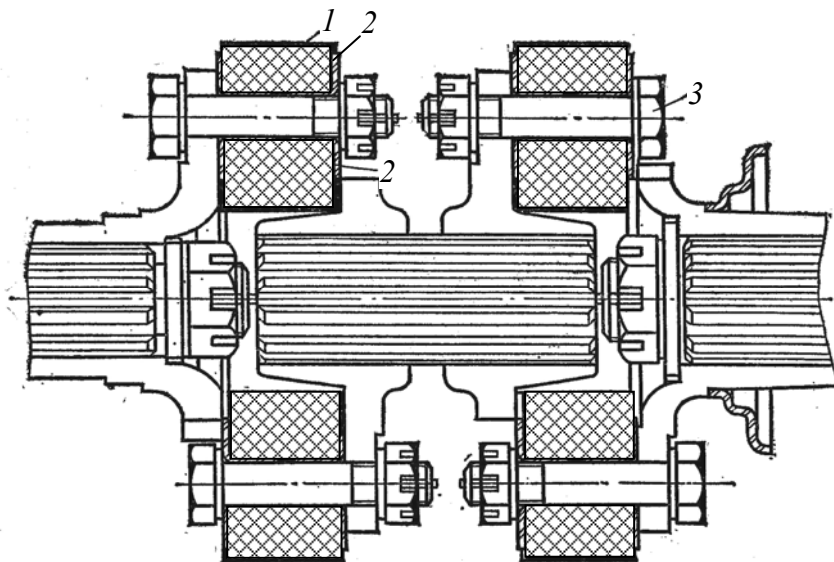


Рис. 2.5. Карданная передача с резиновыми втулками:
1 – резиновая втулка; 2 – обойма; 3 – болт

При использовании такой муфты с резиновыми втулками возможно максимальное угловое смещение (при передаче наибольшего крутящего момента) до 8° . Преимущества упругих карданных муфт – дешевизна их изготовления и простота эксплуатации. Однако к резине здесь предъявляются повышенные требования. Прочность на разрыв должна быть не меньше 1500 Па/см^2 , относительное удлинение не менее 35%, твердость HRC 65–75. Резина должна быть морозо- и теплоустойчивой и обеспечивать работоспособность от -40 до 60°C .

В трансмиссии тракторов наибольшее распространение в качестве промежуточного соединения получили упругие полукарданные шарниры, допускающие передачу крутящего момента без дополнительных нагрузок на детали трансмиссии при перекосах валов до $4-7^\circ$. Когда расстояние между соединяемыми элементами невелико, на тракторе устанавливают одинарный упругий шарнир (рис. 2.6, а), который состоит из двух вилок 2 и 4, изготовленных как одно целое с валом 1 и шлицевой ступицей 3. Между вилками заложены резиновые подушки 5, удерживаемые от выпадения прижимами 6, укрепленными на вилках винтами.

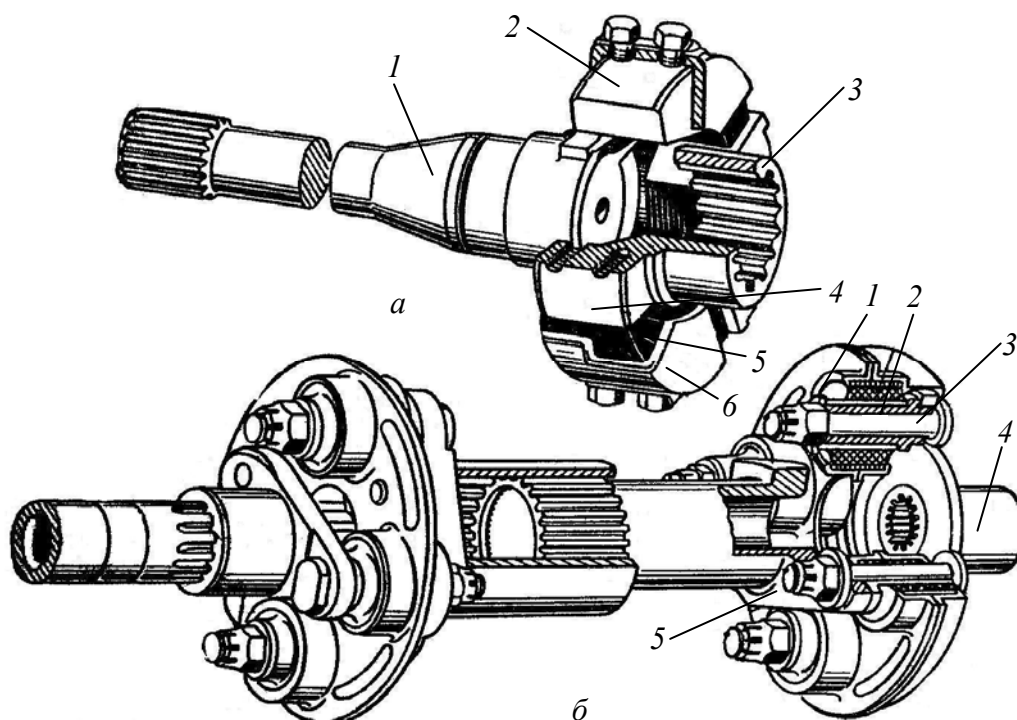


Рис. 2.6. Упругий полукарданный шарнир:
 а – одинарный: 1 – вал сцепления; 2, 4 – вилки; 3 – ступица;
 5 – резиновая подушка; б – прижим; б – двойной: 1 – стальной хомут;
 2 – резиновые втулки; 3 – палец; 4, 5 –вилки

Если расстояние между механизмами, которые нужно соединить, большое (более 400 мм), в промежуточном соединении применяют два упругих полукарданных шарнира (рис. 2.6, б). Каждый из них состоит из стального хомута 1, в котором установлены четыре резиновые втулки 2. В две из них вставлены пальцы 3 вилки 4, а в остальные – пальцы вилки 5, расположенные по отношению к вилке 4 под углом 90° . Упругие элементы муфты выполняют функции дополнительного гасителя крутильных колебаний в трансмиссии из-за наличия в упругом элементе внутреннего трения.

Из жестких шарниров наиболее широко используются шарниры неравных угловых скоростей, как наиболее простые по конструкции.

Шарнир с крестовиной (рис. 2.7) неравных угловых скоростей передает крутящий момент от одного вала к другому через подвижные соединения жестких деталей. Он состоит из двух вилок 2 и 5, в цилиндрических отверстиях которых установлены концы А, Б, В и Г соединительного элемента крестовины 3. Вилки жестко закреплены на валах 1 и 4. При вращении валов концы Б и Г крестовины покачиваются относительно плоскости, перпендикулярной к оси вала 1.

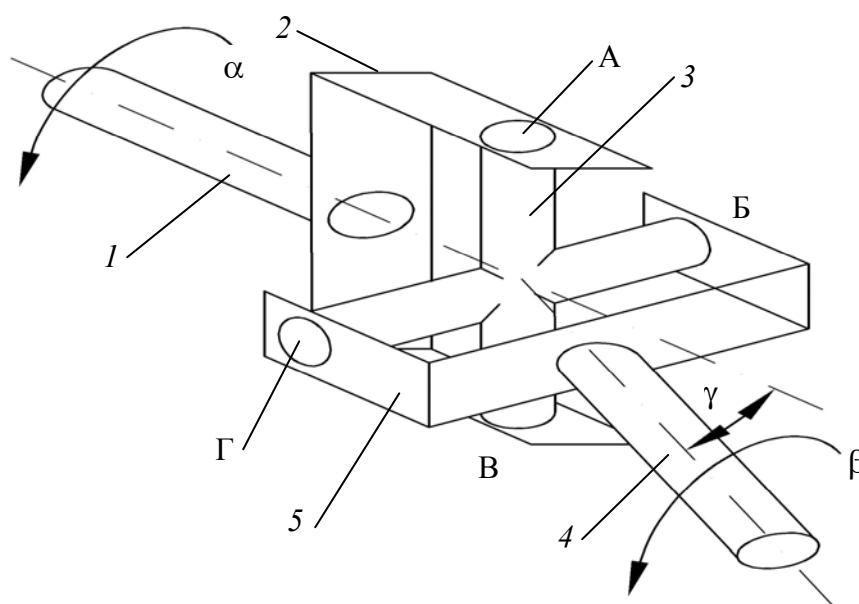


Рис. 2.7. Кинематическая схема карданной передачи с жестким шарниром неравных угловых скоростей

При повороте вала 1 вокруг своей оси на угол α вал 4 поворачивается вокруг своей оси на угол β . Соотношение между углами поворота валов 1 и 4 определяется выражением $\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}\beta \cdot \cos\gamma$, где α – угол поворота ведущего вала; β – угол поворота ведомого вала; γ – угол между

осями валов. Из этого выражения следует, что угол β то больше угла α , то равен ему. Равенство этих углов наступает через каждые 90° поворота вала 1 . Следовательно, при равномерном вращении вала 1 частота вращения вала 4 неравномерна и изменяется по синусоидальному закону в зависимости от времени. Она то больше, то меньше частоты вала 1 . Неравномерность вращения тем больше, чем больше угол γ между осями валов. В результате неравномерного вращения вала, расположенного за карданным шарниром, в трансмиссии возникают дополнительные пульсирующие нагрузки на элементы трансмиссии, что отрицательно сказывается на ресурсе машины. Эти нагрузки тем больше, чем больше неравномерность вращения. При γ до $15\text{--}20^\circ$ они превышают нагрузки от крутящего момента двигателя. Такая карданная передача называется *асинхронной* или *неравных угловых скоростей*.

Чтобы избежать неравномерность вращения валов, в карданной передаче устанавливают два карданных шарнира так, чтобы углы γ_1 и γ_2 (рис. 2.8) были равны, вилки 4 и 6 карданных шарниров, закрепленные на неравномерно вращающемся валу 5 , должны быть расположены в одной плоскости.

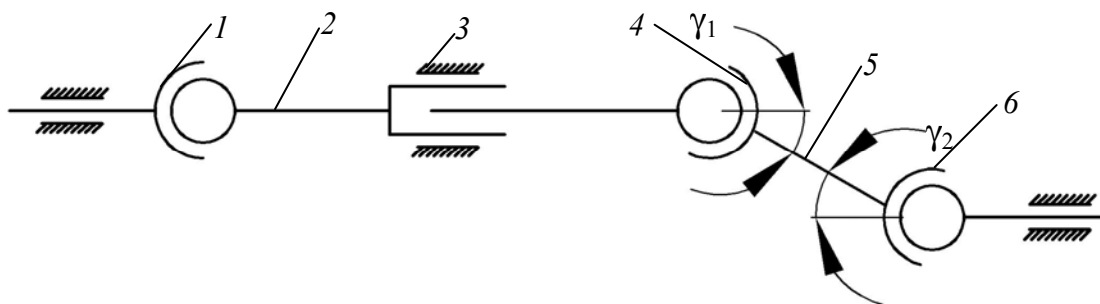


Рис. 2.8. Кинематическая схема карданной передачи с двумя шарнирами неравных угловых скоростей – синхронная

При соблюдении указанных условий *фазы* угловых смещений совпадают и взаимно компенсируются. Данная карданная передача является *синхронной* или *равных угловых скоростей*.

Карданная передача с двумя несинхронными шарнирами и длиной, равной нулю, представляет собой сдвоенный шарнир (рис. 2.9). Для равенства углов наклона валов, что является условием синхронности, служит центрирующее устройство, которое состоит из сферической обоймы 6 , вставленной в расширение на конце вала 1 , сферического сухаря 7 , установленного на конце вала 4 , и резинового защитного чехла 5 .

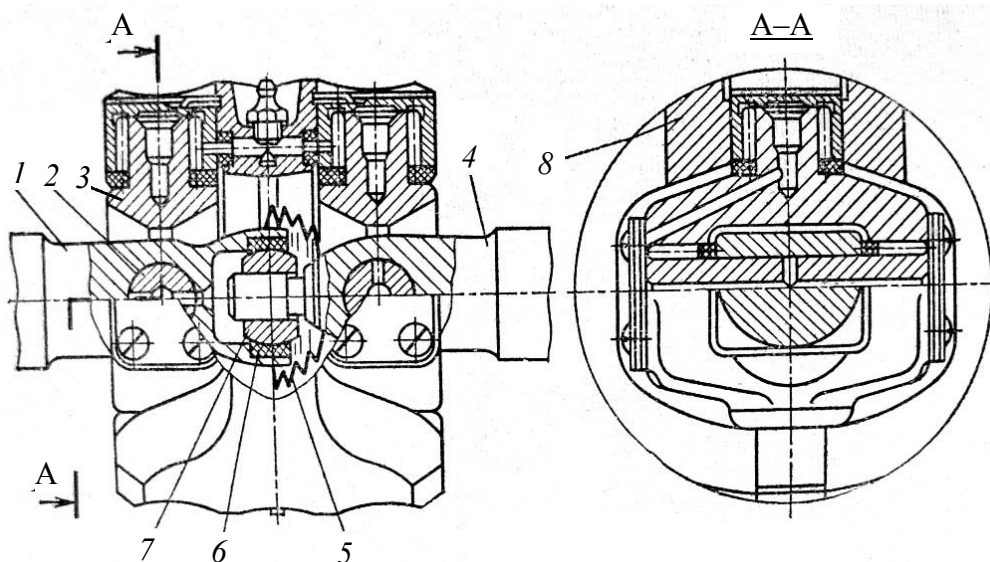


Рис. 2.9. Сдвоенный карданный шарнир:
 1, 4 – валы; 2 – ось; 3 – крестовина; 5 – резиновый чехол;
 6 – обойма; 7 – сухарь; 8 – корпус

В приводе к ведущим управляемым колесам применяются также двойные синхронные карданные передачи (рис. 2.10)

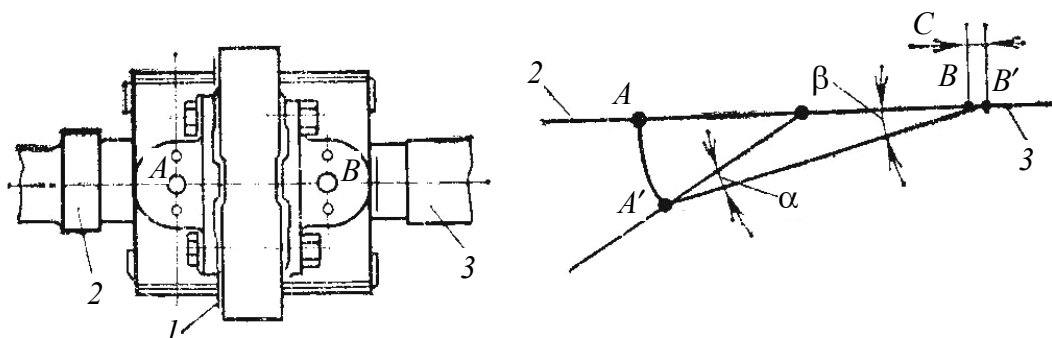


Рис. 2.10. Двойная синхронная карданная передача автомобиля МАЗ

Такие передачи состоят из двух карданных шарниров, соединенных промежуточной деталью 1 (рис. 2.10). Расстояние между центрами шарниров A и B постоянное. Шарнир A и связанный с ним ведомый вал 2 не имеют возможности перемещаться в осевом направлении. При повороте колеса вокруг шкворня шарнир A переходит в положение A' , а ведущий шарнир B смещается в положение B' . Осевой ход шарнира B осуществляется в шлицевом соединении ведущего вала 3 с шестерней колесного редуктора. Углы α и β поворота карданного вала 2 почти равны, а угловая скорость ведомого вала практически равномерна.

На рис. 2.11 показана конструкция карданной передачи с шарнирами неравных угловых скоростей.

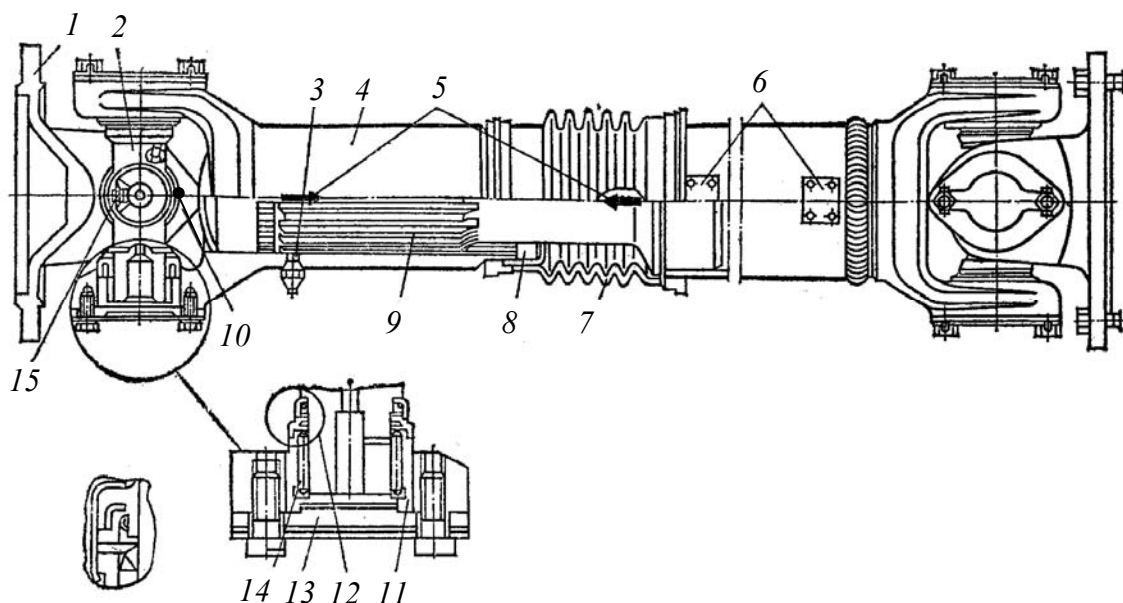


Рис. 2.11. Карданная передача с шарнирами неравных угловых скоростей:
 1, 4 – вилки; 2 – крестовина; 3 – масленка; 5 – установочные стрелки;
 6 – балансирующая пластина; 7 – чехол; 8 – уплотнение; 9 – шлицевой вал;
 10 – масленка; 11 – стакан; 12 – сальник; 13 – фланец;
 14 – игольчатый подшипник; 15 – клапан

Шарнир состоит из двух вилок 1 и 4 (рис. 2.11), крестовины 2, опор 14 для цапф крестовины и уплотняющих устройств.

Опорами для цапф могут быть игольчатые или шариковые подшипники, стальные втулки, а также резиновые втулки (сайлент-блоки). Чаще всего используют игольчатые подшипники, обеспечивающие компактность конструкции, высокий КПД и долговечность.

Элемент, компенсирующий изменения расстояния между соединяемыми агрегатами, – подвижное шлицевое соединение вилки 4 и наконечника 9 трубы карданного вала. Смазыванию и уплотнению этого соединения при эксплуатации следует уделять особое внимание во избежание появления значительных осевых усилий, дополнительно нагружающих соединяемые механизмы и карданную передачу.

Шлицевые соединения смазывают через масленку 3. От попадания пыли и грязи соединение защищено войлочным уплотнением и гофрированным чехлом 7.

Вилки карданного шарнира штампуют из среднеуглеродистых сталей 35, 40, 45 или легированной 40ХНМА. Крестовину штампуют

из малоуглеродистых легированных сталей 12ХНЗА, 18ХГГ и 20Х; шипы цементируют с последующей закалкой и отпуском.

Условия работы игольчатых подшипников карданных валов характеризуются наличием циклических нагрузок с частотой колебаний 1000–3000 мин⁻¹. Основным параметром, влияющим на работоспособность подшипника, является нагрузка или крутящий момент. Контактные напряжения в игольчатых подшипниках большинства автомобилей достигают 2000 МПа на отдельных моделях грузовых автомобилей – 3000 МПа. В момент трогания автомобиля они могут достигать 3400–3900 МПа, что сопоставимо с контактными напряжениями, реализуемыми в гипоидных передачах. Рабочая температура игольчатых подшипников большинства автомобилей лежит в пределах 50–90°С.

Недостаточная долговечность подшипников вызвана в основном конструктивными причинами, недостаточной степенью герметизации узла, наличием в карданной передаче высокочастотных вибраций. Характерными видами разрушений карданных подшипников являются ложное бринеллирование на дорожках качения и шипах крестовин, их износ с усталостным выкрашиванием в нагруженной зоне, задир торцов шипов крестовин, поломка иголок, фреттинг-коррозия и т.п.

Ранее все крестовины карданных валов снабжались масленками и клапанами соответственно для заправки и удаления излишков масла, так как шарниры смазывали только трансмиссионными маслами (ТАп-15, ТАп-15В и др.). Использование же пластичных смазок в этих узлах категорически запрещалось. Несмотря на регулярное обслуживание, работоспособность шарниров оставалась низкой и не превышала 30–50 тыс. км. Это объясняется быстрым выбрасыванием масла через кромки радиальных сальников из масленок и особенно через предохранительный клапан. Выброс смазочного материала способствует накоплению значительных количеств пыли и грязи на поверхностях крестовин и сальников, а это повышает износ деталей и вероятность выхода из строя узла.

Радикальное решение проблемы стало возможным при использовании высококачественных пластичных смазок в сочетании с установкой уплотнений, обеспечивающих герметизацию узла. Так, на автомобилях МАЗ применение смазки № 158 в тех же крестовинах снизило износ в 3,1–6,0 раз по сравнению с маслом ТАп-15В. Внедрение указанных мероприятий позволило исключить операции по техническому обслуживанию данных узлов в процессе эксплуатации

(шарниры не требуют пополнения смазки). В крестовинах таких карданных шарниров нет масленок, а осевые каналы выполнены в них глухими (рис. 2.12). Выполнение жестких требований в отношении точности изготовления карданных передач, а также применение прогрессивных конструктивных решений и выбора смазки позволило увеличить ресурс карданов в зависимости от типа автомобиля и дорожных условий до 100–150 тыс. км.

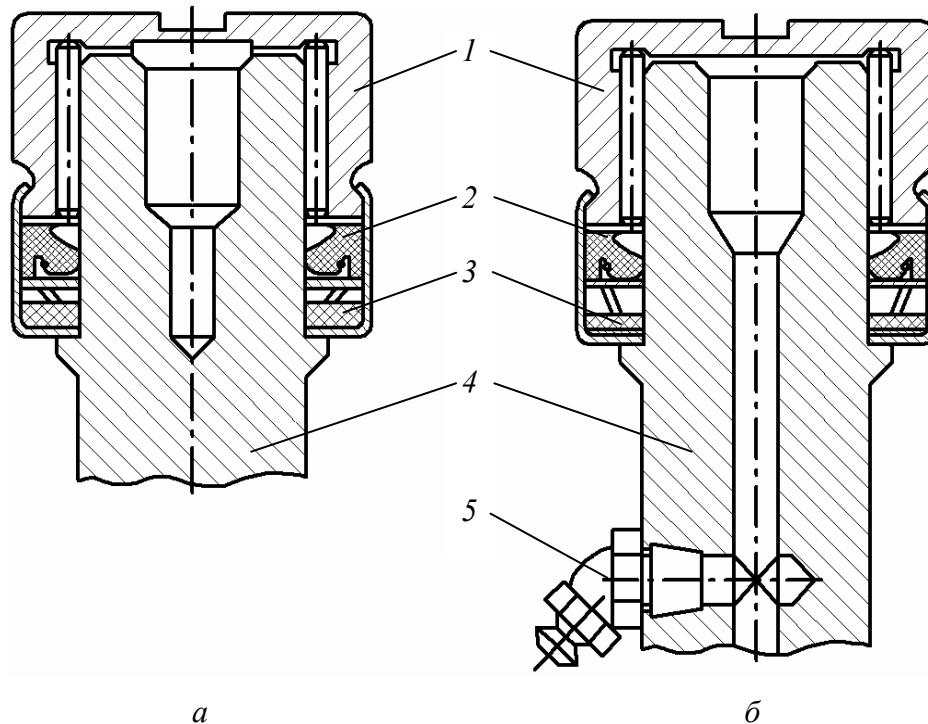


Рис. 2.12. Шарниры карданных валов с торцевыми уплотнениями: *а* – автомобилей ЗИЛ, Урал; *б* – автомобилей КрАЗ, МАЗ, КамАЗ; 1 – подшипник; 2 – сальник подшипника; 3 – торцевое уплотнение; 4 – крестовина; 5 – пресс-масленка

Карданные шарниры равных угловых скоростей предназначены для передачи крутящего момента на ведущие и/или управляемые колеса переднеприводного или полноприводного автомобиля.

Принцип действия карданного шарнира равных угловых скоростей может быть проиллюстрирован схемой (рис. 2.13).

Валы 1 и 4 соединены между собой рычагами 2 и 3. Рычаги контактируют в точке Б, линейная скорость которой одинакова для обоих рычагов, т.е. $v = \omega_1 \cdot b = \omega_2 \cdot a$. Равенство угловых скоростей $\omega_1 = \omega_2$ возможно, если $b = a$. Это условие выполнимо, если угол θ равен углу ψ , т.е. если точка Б контакта рычагов лежит на биссектрисе угла $180^\circ - \gamma$.

При вращении валов точка Б должна перемещаться в биссекторной плоскости. Конструктивно это условие можно обеспечить разными способами. По конструкции карданные шарниры бывают шариковые с делительными канавками, шариковые с делительным рычагом, кулачковые и сдвоенные.

К наиболее распространенным конструкциям карданных шарниров равных угловых скоростей относятся следующие: шариковый шарнир с делительными канавками (типа Вейс), используемый на автомобилях ЗИЛ-131 и ГАЗ-66; кулачковый шарнир с диском (типа Тракта), применяемый на большегрузных автомобилях Уральского, Камского и Кременчугского автозаводов; сдвоенные карданные шарниры с игольчатыми подшипниками (автомобили МАЗ). Характерной особенностью условий работы пар трения этих узлов являются повышенные удельные нагрузки. Для шариковых и сдвоенных шарниров характерно трение качения в сочетании со скольжением, а для шариков Тракта – только трение скольжения.

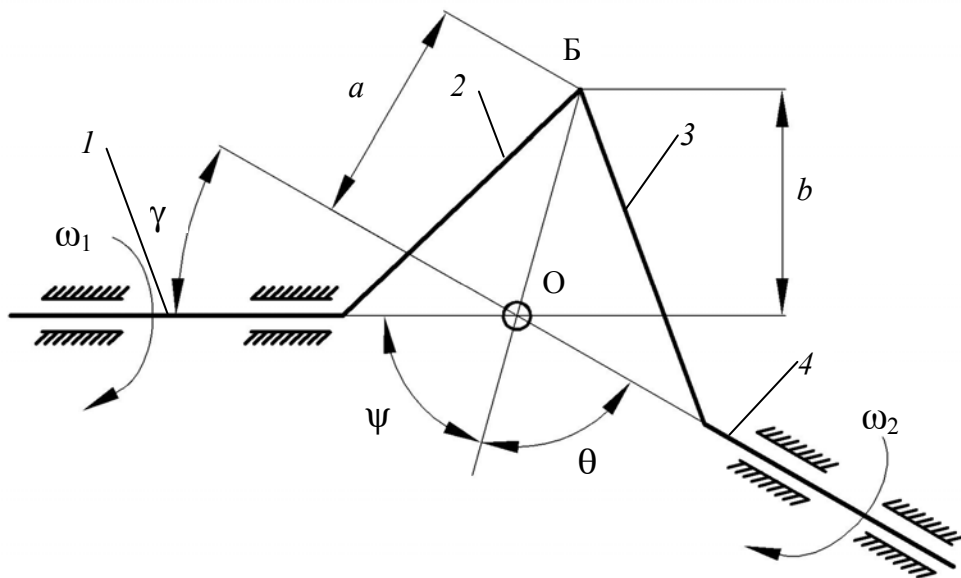


Рис. 2.13. Кинематическая схема карданного шарнира равных угловых скоростей

Шариковый карданный шарнир с делительными канавками имеет два кулака 5 (рис. 2.14), изготовленных как одно целое с валами 1 и 6. В каждом кулаке выполнено по четыре канавки, в которые закладываются четыре шарика 3. Пятый шарик 7 расположен между торцами кулаков и обеспечивает их центрирование.

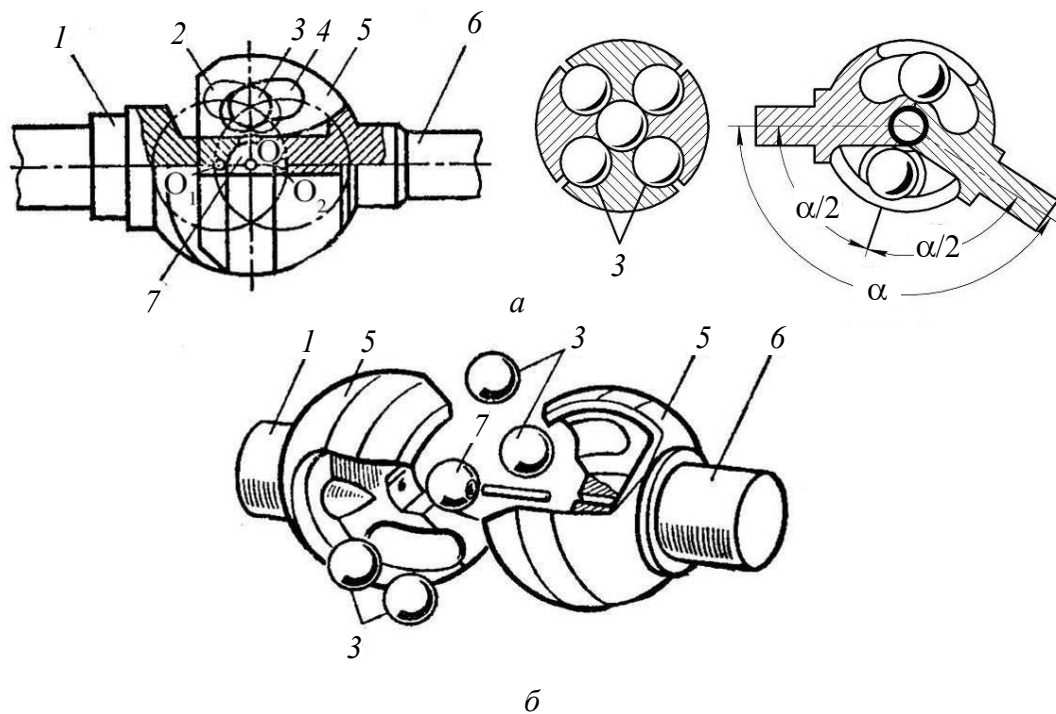


Рис. 2.14. Шарниры равных угловых скоростей с делительными канавками (типа Вейс):
a – схема; *б* – детали; 1, 6 – валы; 2, 4 – пара сопряженных делительных канавок;
 3 – ведущие шарики; 5 – кулак; 7 – центрирующий шарик

При вращении валов *1* и *6* в любую сторону крутящий момент передается от одного кулака к другому через два шарика. Каждый из четырех периферийных шариков лежит одновременно в канавках обоих кулаков, а его центр при этом располагается на пересечении осей канавок в точке, которая лежит в плоскости, проходящей через точку *O*. Вследствие этого при вращении валов и изменении угла между их осями шарики *3* всегда устанавливаются в биссекторной плоскости.

Такие шарниры могут работать при углах поворота колес до 30–32°. При этом наблюдается повышенный износ вследствие проскальзывания шариков. Ресурс таких шарниров достигает 50–60 тыс. км. Для них характерна работа при высоких контактных напряжениях, достигающих 3400–3900 МПа. В тяжелых условиях температура узла трения повышается до 150–200°C, а максимальный крутящий момент до 80 Нм. В результате недостаточных смазывающих свойств применяемых смазочных материалов нарушается нормальная эксплуатация узла (повышение температуры, стук, задиры и вырывы металла на рабочих поверхностях), что приводит к выходу его из строя задолго до выработки рабочего ресурса. К уменьшению этого ресурса приводит также попадание воды, пыли и других абразивных материалов.

В шариковом карданном шарнире с делительным рычажком (рис. 2.15) связь между ведущей звездочкой 3 и сферической чашкой 1, выполненной как одно целое с валом 7, осуществляется шестью шариками 4, заключенными в сепаратор 2. При повороте вала 7 относительно вала ведущей звездочки, делительный рычажок 6 через направляющую чашку 5 поворачивает сепаратор, и шарики устанавливаются в биссекторной плоскости. Крутящий момент в таком шарнире передается через все шарики как при переднем, так и при заднем ходе. Поэтому нагрузка на последние меньше, чем в карданном шарнире с делительными канавками. При тех же размерах, что и карданные шарниры с делительными канавками, шарниры с делительным рычажком могут передавать больший крутящий момент. Они работают при углах до 38° .

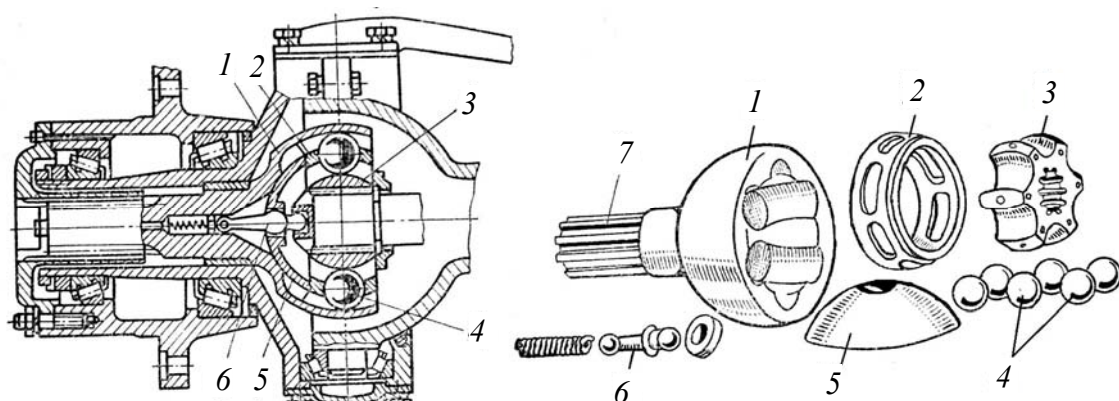


Рис. 2.15. Шариковый карданный шарнир равной угловой скорости с делительным рычажком: 1 – чашка сферическая; 2 – сепаратор; 3 – звездочка ведущая; 4 – шарики; 5 – чашка направляющая; 6 – рычажок делительный; 7 – вал ведомый

На рис. 2.16 показан кулачковый дисковый карданный шарнир равной угловой скорости, используемый для привода передних колес автомобиля (Урал-377). В вилках 2 и 6 валов 1, 7 выполнены цилиндрические пазы, оси образующих которых перпендикулярны к валам. В пазах вилок установлены кулачки 3 и 5, шарнирно соединенные между собой диском 4, входящим в их вырезы. При передаче вращения, когда валы 1 и 7 расположены под углом, каждый из кулачков 3 и 5 поворачивается одновременно относительно вилки и диска. Оси пазов вилок лежат в одной плоскости с осями валов и расположены на одинаковых расстояниях от точки их пересечения. Поэтому точка пересечения осей пазов при любом положении вилок находится в биссекторной плоскости.

При эксплуатации шарнира вследствие высоких удельных нагрузок имеют место задиры и выкрашивание металла на рабочих поверхностях диска и кулаков.

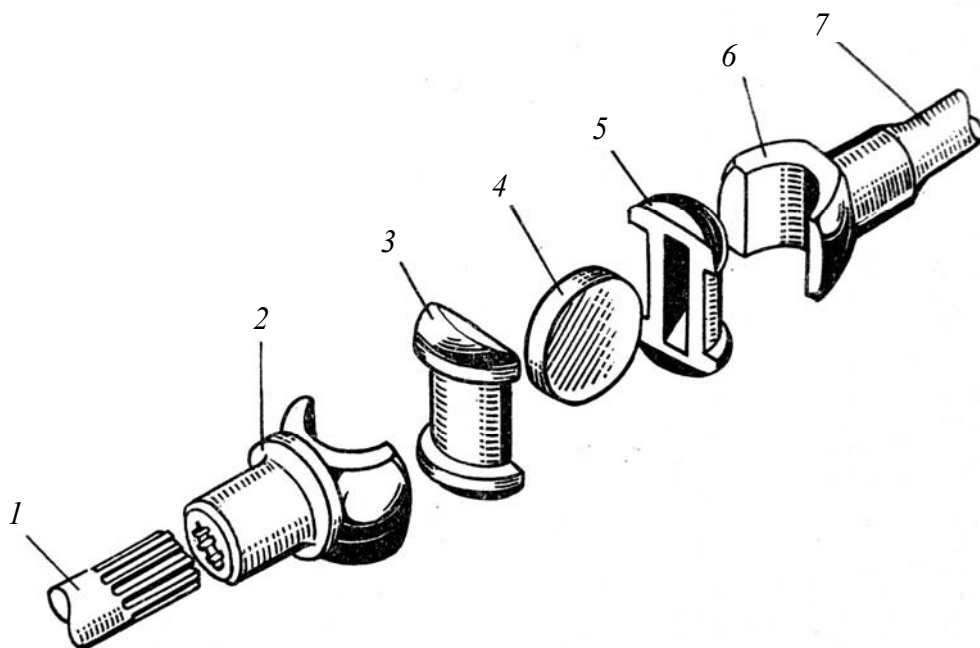


Рис. 2.16. Кулачковый карданный шарнир равной угловой скорости дисковый (типа Тракта):
1, 7 – валы; 2, 6 – вилки; 3, 5 – кулаки; 4 – диск

Кулачковый карданный шарнир без диска (рис. 2.17) состоит из вилок 1 и 6, в которых установлены два кулака 2 и 5, соединенные между собой с помощью шипа 3 и паза 4.

Кулачковые карданные шарниры могут работать при углах между валами до 50° . Благодаря большой площади контакта поверхностей деталей шарниры имеют сравнительно небольшие размеры. Основной их недостаток – более низкий КПД, чем шариковых шарниров. Они больше нагреваются, создают шум при работе, быстро изнашиваются и требуют обильного смазывания.

Специфика работы смазочного материала в карданных шарнирах равных угловых скоростей состоит в предотвращении прямого контакта поверхностей трения сопряженных деталей, работающих при высоких удельных нагрузках в режиме качения, скольжения и вибрации.

Карданные передачи включают и другие узлы трения, которые смазывают пластичными смазками, например, шлицевые скользящие соединения и промежуточные опоры карданных валов.

Шлицевые соединения характеризуются относительно невысокими удельными нагрузками, редко превышающими 10–20 МПа. Для них типичны максимальные температуры не выше 60°C, рабочие – порядка 50°C. Режим трения шлицевых соединений, также как и в карданных шарнирах равных угловых скоростей, реверсивный, для них также характерны трение скольжения и вибрация.

В *промежуточных опорах* используются шариковые и роликовые подшипники, установленные на резиновой подушке и защищенные сальниками и грязеотражателями. Подшипники работают при невысоких нагрузках и температурах. К смазкам для этих узлов повышенных требований не предъявляется.

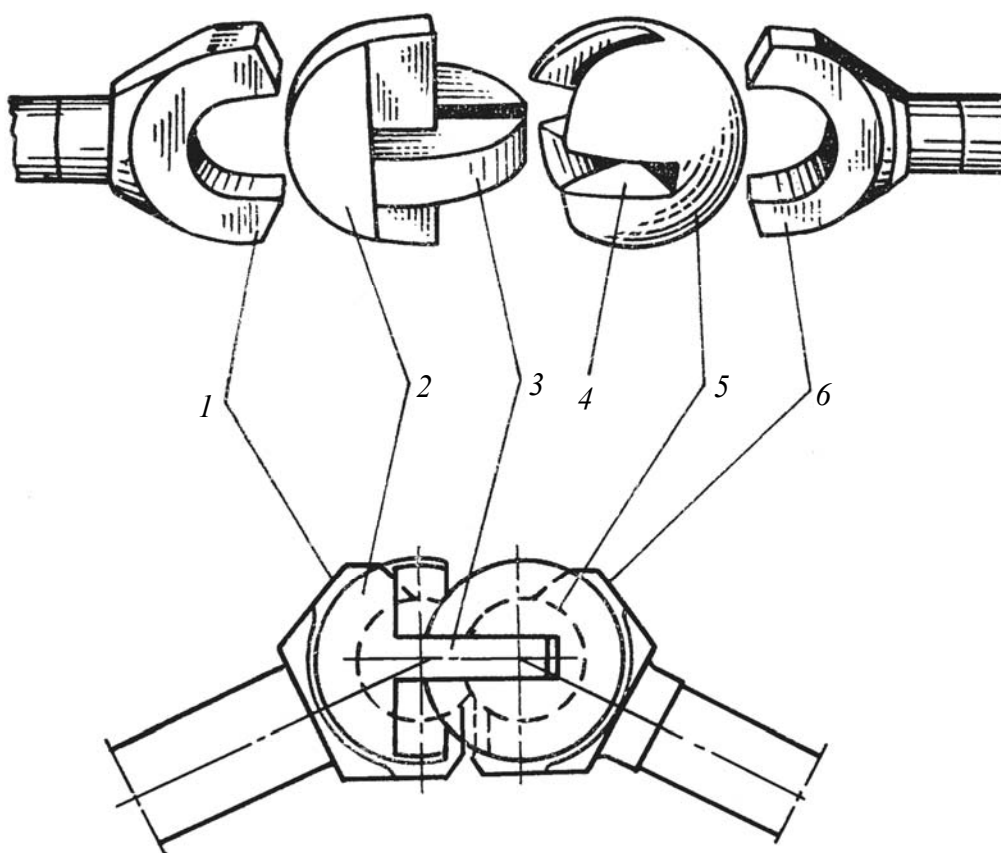


Рис. 2.17. Кулачковый карданный шарнир равной угловой скорости без диска:
1, 6 – вилки; 2, 5 – кулаки; 3 – шип; 4 – паз

Рессоры. Наибольшее распространение в настоящее время, особенно на грузовых автомобилях, имеют подвески, состоящие из листовых рессор. Рессора собрана из упругих выгнутых стальных листов различной длины, между которыми вводят пластичную смазку.

В процессе эксплуатации, если рессоры не снабжены защитными чехлами, смазка удаляется, а в местах трения образуются задиры и происходят поломки листов, вследствие чего рессора выходит из строя. Обычно передний конец рессоры шарнирно соединен с кронштейном рамы при помощи пальца. На грузовых автомобилях такие шарнирные соединения смазывают пластичной смазкой через пресс-масленку. Палец втулки рессоры работает в режиме качательного движения с частотой до 200 качаний в минуту при нагрузке 4–12 МПа и максимальной температуре, не превышающей 60°C. Он выходит из строя вследствие повышенного износа, обычно абразивного. Детали рессор изнашиваются с интенсивностью $0,2\text{--}10 \text{ мм} \cdot 10^{-4} \text{ км}$ [3].

Представленный материал показывает разнообразие условий работы смазок в узлах и то, что пластичные смазки в процессе эксплуатации находятся в постоянном контакте с материалами, из которых изготовлены узлы трения (различные сорта стали, чугуна, цветных металлов, резин, пластмассы). Будучи элементами одной системы узел – смазка, они находятся в сложной взаимосвязи и могут оказывать существенное влияние на свойства друг друга и, в конечном итоге, на надежность системы в целом. Поэтому решать проблему повышения долговечности узлов трения следует комплексно. Так, применение наиболее эффективных технологических приемов упрочнения поверхностей трения может обеспечить двух-пятикратное повышение долговечности, в то время как оптимизация конструктивных параметров узла (в первую очередь повышение герметичности и подбор оптимальной смазки) приводит к десятикратному повышению долговечности узла.

Требования к качеству пластичных смазок. Согласно рассмотренным условиям работы в узлах трения автомобилей и тракторов смазки могут выполнять возлагаемые на них функции только при условии, что их качество будет удовлетворять ряду эксплуатационных требований. Смазки должны:

- разделять трущиеся детали прочной смазочной пленкой для уменьшения износов и потерь на трение;
- удерживаться в узлах трения;
- защищать трущиеся детали от попадания пыли, влаги и грязи, т.е. обладать необходимыми герметизирующими свойствами;
- обеспечивать необходимую защиту от коррозии;
- не изменять свои свойства длительное время при эксплуатации и хранении;

- совмещаться с конструктивными материалами узлов трения;
- обладать необходимой механической стабильностью;
- обеспечивать надежную эксплуатацию при низких температурах и быть устойчивыми к воздействию повышенных температур и агрессивных компонентов атмосферы;
- быть экономичными и недефицитными.

Пластичные смазки являются основным эксплуатационным материалом при первом техническом обслуживании машин. В большинстве случаев пластичные смазки значительно чаще добавляются в узлы трения, чем жидкие (кроме жидкого масла для двигателя), и их применение связано с существенными затратами труда и простоями техники. Поэтому при конструировании новых машин стремятся сократить количество узлов, смазываемых пластичными смазками, и удлинить периодичность замены смазки, например, до капитального ремонта узла трения. Первое достигается применением в узлах трения материалов, не требующих смазки (резина, пластмасса), а второе – использованием смазок более высокого качества и конструктивным усовершенствованием узлов трения.

Качество применяемых смазок влияет на срок службы многих деталей машины, надежность ее работы, а также затраты на техническое обслуживание и ремонт.

3. СОСТАВ СМАЗОК

Пластичные смазки (консистентные смазки, от лат. *consisto* – состою, застываю, густею) – мазе- или пастообразные смазочные материалы, получаемые введением твердых загустителей в жидкие масла (нефтяные, синтетические, растительные) и их смеси. Как правило, пластичные смазки (в литературе часто называемые просто смазками) – *трехкомпонентные коллоидные системы, состоящие из базового масла (дисперсионная среда), загустителей (дисперсная фаза), модификаторов структуры и добавок (наполнители, присадки)*. Схематически типичный состав смазки приведен на рис. 3.1.

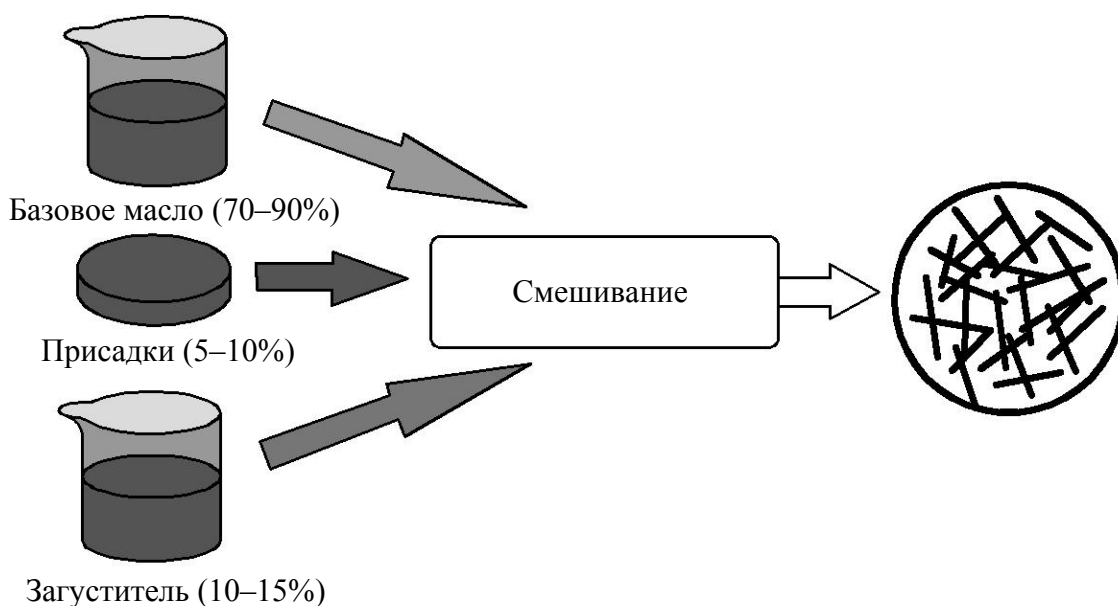


Рис. 3.1. Схема состава пластичной смазки (компоненты смазки)

Благодаря высокой концентрации коллоидные частицы загустителя образуют пространственный каркас, в ячейках которого прочно удерживается большое количество масла с присадками (до 70–90%), самовыделяющегося для смазки поверхности (рис. 3.2). Большинство пластичных смазок имеет волокнистое строение.

Каждая составляющая часть смазки выполняет специфическую функцию: загуститель придает смазке густоту, масло смазывает поверхности трения, наполнители и присадки улучшают функциональные свойства смазок. Высокая степень структурирования дисперсной фазы придает смазкам пластичность, упругость и другие свойства, которыми они значительно отличаются от жидких смазочных материалов.

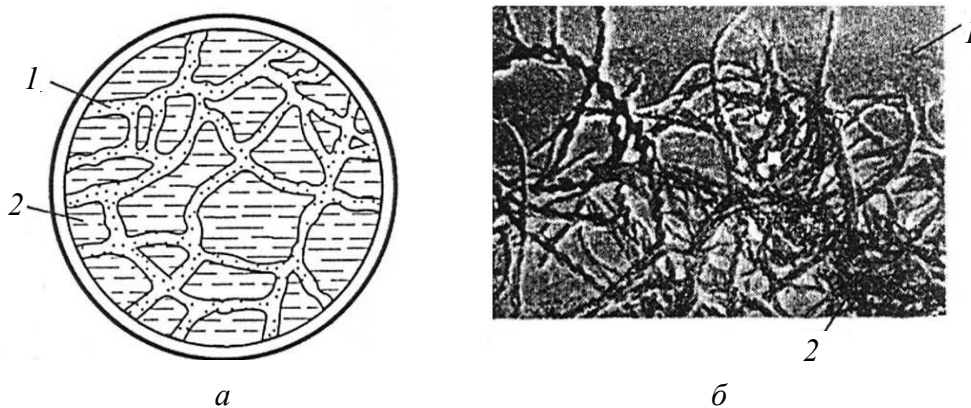


Рис. 3.2. Структура пластичной смазки:

a – схема: 1 – каркас, образованный дисперсной фазой смазки;
 2 – смазочное масло; *б* – фотография (с увеличением в 15 000 раз):
 1 – дисперсионная среда (масло); 2 – дисперсная фаза (литиевое мыло 129)

В соответствии с наиболее общим определением *пластичные смазки – структурированные коллоидные дисперсии загустителя в масле, обладающие свойствами высокопластичного тела и способностью к тиксотропному восстановлению*. Свойства твердого тела смазок при малых нагрузках или в их отсутствие проявляются благодаря наличию в них структурного каркаса: они не растекаются под действием собственной массы, удерживаются на вертикальных поверхностях, не сбрасываются инерционными силами с движущихся деталей. Когда нагрузки малы, структурный каркас и сама смазка не разрушаются, а упруго деформируются. Это обусловлено размерами, формой и характером сцепления частиц загустителя. Структурный каркас смазки не отличается значительной прочностью. Поэтому при некоторых критических нагрузках (обычно 0,1–0,5; реже 2–3 кПа), превышающих предел прочности структурного каркаса, происходят так называемые тиксотропные превращения: смазки разрушаются и начинают деформироваться – течь как пластичное тело без нарушения сплошности; после снятия нагрузок течение прекращается, разрушенный каркас восстанавливается и смазка снова приобретает свойство твердых тел.

3.1. Дисперсионная среда

Жидкая основа в значительной мере определяет вязкостно-температурные характеристики, стабильность и другие свойства пластичных смазок. В качестве дисперсионной среды, содержание которой

в смазках составляет 70–90% по массе, используются различные масла и жидкости. Для получения смазок с различными необходимыми свойствами базовые основы пластичных смазок изготавливаются из товарных нефтяных масел малой и средней вязкости – не более $50 \text{ мм}^2/\text{с}$ при 50°C , полученных переработкой нефти, синтетических масел (искусственно синтезированных), растительных масел (семян подсолнечника, сердцевин ствoла пальмы и др.) и смеси вышеперечисленных масел (в основном нефтяных и синтетических). При подборе жидкой основы учитывается также химический состав (содержание смол, полициклических ароматических углеводородов, кислородных соединений), заметно влияющий на формирование структуры смазок.

От свойств дисперсионной среды зависит работоспособность смазок в определенных интервалах температур, силовых и скоростных нагрузок, их окисляемость, коллоидная стабильность, защитные свойства, устойчивость к агрессивным средам, радиации, а также набухаемость контактирующих со смазками изделий из резины и полимеров. Низкотемпературные свойства смазок (вязкость при отрицательных температурах, пусковой и установившийся крутящие моменты) зависят от вязкости дисперсионной среды при низких температурах, а испаряемость – от молекулярной массы, фракционного состава, температуры вспышки дисперсионной среды и продолжительности температурного воздействия.

При низких температурах пусковой крутящий момент также является функцией вязкости дисперсионной среды, определяемой при той же температуре.

Смазки работоспособны до такой температуры, при которой их вязкость не более $2000 \text{ Па}\cdot\text{с}$, пусковой крутящий момент меньше $50 \text{ Н}\cdot\text{см}$ и установившийся крутящий момент не выше $10 \text{ Н}\cdot\text{см}$.

Минеральное вязкое масло применяется для смазок, работающих в сильнонагруженных, но тихоходных механизмах. Оно повышает нагрузочную способность, липкость, защищает от коррозии, лучше подавляет вибрацию, шум, но имеет плохие низкотемпературные свойства. Маловязкие масла применяются для смазок быстроходных узлов, например, в подшипниках качения. Чаще всего в производстве смазок используются нефтяные масла, реже – парафиновые и ароматические. Масла с низким индексом вязкости быстрее загущаются и требуют меньше загустителя. Парафиновые масла с высоким индексом вязкости характеризуются широким интервалом рабочей

температуры. Нефтяные масла используют прежде всего в смазках общего назначения, работоспособных в интервале температур от -60 до 150°C (на дистиллятных маслах от -60 до 130°C и на остаточных – от -30 до 150°C).

Около 97% смазок готовят на нефтяных маслах.

Синтетические масла (эфирные, силиконовые и др.) используются только в тех случаях, когда смазки на основе минеральных масел не удовлетворяют эксплуатационным требованиям. Смазки на основе синтетических масел обладают лучшей окислительной стабильностью, высокотемпературными и низкотемпературными свойствами, повышенной стойкостью к загрязнениям и агрессивным веществам.

Смазки, изготовленные на синтетических маслах (полисилоксаны, полигликоли, сложные эфиры, перфтор-, перхлоруглероды и др.), применяют для узлов трения, работающих длительное время при температурах ниже -60 и выше 150°C . На этих маслах можно получить смазки, работающие при температурах от -100 до 350°C и выше. Так, фтор-, фторхлоруглеродные масла термически стабильны до температуры $400-500^{\circ}\text{C}$. Они не воспламеняются, не горят, устойчивы к воздействию сильных кислот, щелочей и других агрессивных сред, не окисляются, не вызывают коррозии металлов, обладают высокими смазывающими свойствами. Поэтому их применяют для получения огнестойких смазок, контактирующих с агрессивными средами, и в экстремальных условиях.

Широкое применение таких масел ограничено их дефицитом и высокой стоимостью.

Регулирование эксплуатационных свойств смазок и более эффективное их использование достигается применением композиций синтетических и нефтяных масел.

Масла растительного происхождения (например, касторовое масло) в настоящее время все шире применяются при производстве смазок. Это обусловлено экологическими проблемами. Применяемые на открытых частях машин смазки могут попадать в окружающую среду. Желательно, чтобы они разлагались с образованием нетоксичных веществ. Натуральное растительное масло хорошо усваивается микроорганизмами и насекомыми. Синтетические эфирные и полигликолиевые масла разлагаются микрогрибками. Минеральные масла разлагаются труднее всех. Поэтому для производства экологически безвредных смазок применяются растительные масла. Работы в этом направлении весьма перспективны, поскольку материалы на основе

компонентов биосферного происхождения значительно безопаснее для окружающей среды, чем минеральные аналоги.

3.2. Дисперсная фаза

Загустители (thickeners) – это мягкие, мылообразные органические вещества, которые смешиваются с маслом для повышения его густоты до необходимого, в зависимости от назначения, уровня. Задача загустителей состоит в том, чтобы превратить жидкое базовое масло в консистентный материал. Загуститель не должен растворяться в масле. Не растворяясь, он должен разбухать в масле, образуя желеобразную массу и сепарировать небольшое количество масла для обеспечения точки смазки. В качестве загустителей чаще всего применяют соли металлов и жирных органических кислот, которые называют *мылами*.

Загустители определяют свойства смазок и являются основой для их характеристики. Волокнистая структура загустителя обуславливает густоту, консистенцию и механическую стабильность смазки, а химическая – стойкость к высокой температуре и другие химические свойства. Содержание загустителей в смазках составляет, как правило, 10–15%, при низкой загущающей способности – до 20–50% по массе, размер частиц 0,1–10,0 мкм.

Температурные пределы применения смазок во многом определяются температурами плавления и разложения загустителя, его растворимостью в масле и концентрацией в смазке. От природы загустителя зависят антифрикционные и защитные свойства, водостойкость, коллоидная, механическая и антиокислительная стабильность смазок. Мыла, являясь поверхностно-активными веществами, выполняют в смазках одновременно функции загустителя, противоизносного и противозадирного компонентов.

В качестве загустителей применяют *простые, смешанные и комплексные мыла металлов Ca, Li, Ba, Al, а также твердые углеводороды, силикагели, полимеры* и другие вещества. При определении сорта смазки указывается тип загустителя. Для получения высококачественных смазок необходимо применять модифицированные загустители (мыла жирных кислот и неорганические загустители). Модификаторы способствуют формированию более прочной и эластичной структуры смазки, так как модифицирующее действие, например, мыл по по-

верхности трения связано с поверхностно-молекулярным, а не химическим взаимодействием.

Кратко охарактеризуем типы загустителей.

3.2.1. Мыла металлов

Простые мыла металлов получают из натуральных или синтетических жирных кислот. Смазки на мылах синтетических жирных кислот составляют около 65% от общего производства. Больше всего производится смазок, в состав которых входят загустители на простых мылах – около 85%.

Мыльные смазки разделяют в зависимости от катиона на кальциевые, натриевые, литиевые и др. Среди Са-смазок, выпуск которых составляет 75% выработки всех пластичных смазок, особенно важны составы на гидратированных Са-мылах – *солидолы*, работающие при температурах от -30 до 70°C . Распространены (10% выпуска всех смазок) также Na-смазки, особенно *консталины*, работоспособные до 110 – 120°C . Однако они растворимы в воде и легко смываются с металлических поверхностей. Все большее распространение получают многоцелевые Li-смазки – *литолы*, совмещающие достоинства кальциевых (водостойкость) и натриевых (температура каплепадения 170 – 200°C) смазок и работоспособные при температурах от -50 до 130°C .

В Западной Европе доля смазок на литиевых мылах достигает 60%. Смазки обладают хорошим комплексом свойств и пригодны для смазывания большинства узлов трения машин – высокоскоростных и сильно нагруженных подшипников, а также узлов шасси, которые нагреваются до 120 – 130°C . Благодаря сохранению работоспособности при низких температурах, они считаются многоцелевыми и универсальными. Литиевые смазки водостойки и не твердеют при продолжительном нагревании. Это достаточно долговечные смазки, обладающие хорошей стабильностью эксплуатационных свойств. В качестве примера можно привести марки смазок – *Литол-24*, *Фиол*, *Северол* и др.

На рис. 3.3. показаны фотографии смазок (сделаны с большим увеличением), на которых виден каркас, образованный различными загустителями.

Смешанные мыла металлов производят путем смешения двух, реже трех, мыл разных металлов. Ими бывают смешанные мыла Na – Ca, Li – Ca и Na – Li – Ca, на основе которых изготавливают

смазки с соответствующими названиями. Эти смазки обладают некоторыми улучшенными свойствами, например, смазки Na – Ca работоспособны при более низкой температуре, чем смазки Li, а их температура каплепадения выше по сравнению со смазками Ca.

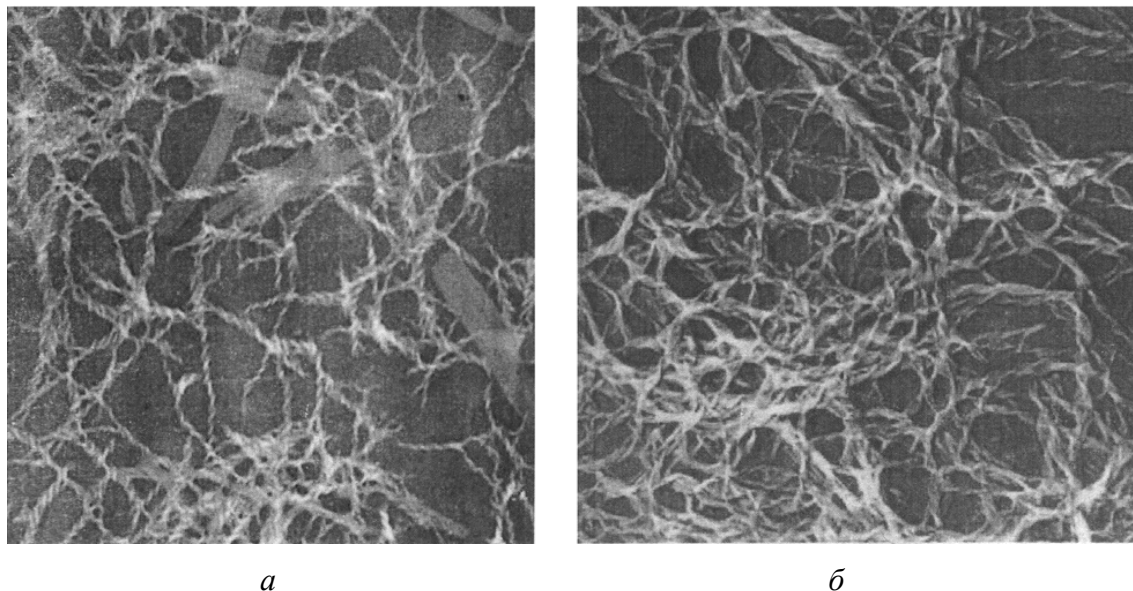


Рис. 3.3. Структуры смазок, образованных различными загустителями:
а – Ca-мыло; *б* – Li-мыло

Комплексные мыла металлов получают из нескольких солей одного металла. Обычно одной солью является жирное мыло (например, стеарат), а другой – соль более простой органической (например, ацетат) или неорганической (например, карбонат) кислоты. При производстве подбираются такие комплексные мыла, которые способствуют улучшению механических и термических свойств смазок. Смазки на основе комплексных мыл составляют около 10% всех смазок, и их доля постоянно увеличивается.

Широко используют безводные пластичные смазки на основе комплексных соединений Ca-мыл (кCa-смазки), в которых загустителями служат комплексные соединения солей высокомолекулярных (обычно стеариновой) и низкомолекулярных (как правило, уксусной) жирных кислот. Эти смазки более термостойки по сравнению с обычными кальциевыми и работоспособны до 160°C.

Текстура комплексных загустителей разнообразна. Чаще проявляется волокнистая структура каркаса загустителя (рис. 3.4). Комплексные загустители позволяют существенно повысить прочность пространственного каркаса смазки.

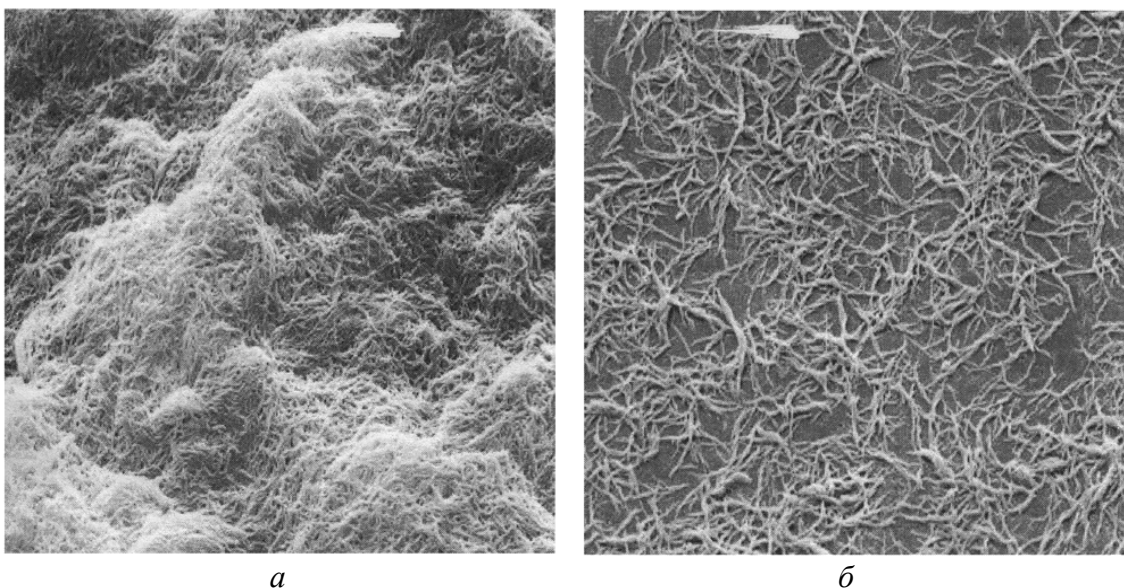


Рис. 3.4. Сравнение структур смазок, образованных комплексным и простым загустителями:
а – Li-комплексный загуститель; *б* – Li-загуститель

3.2.2. Углеводородные загустители

Углеводородные смазки получают путем сплавления жидкого масла с твердыми углеводородами – парафином или церезином. Масло можно загущать петролатумом – продуктом депарафинизации масел. Углеводородные смазки не растворяются в воде и почти не проницаемы для водяных паров. Они имеют хорошие защитные свойства, высокую химическую и коллоидную стабильность. Температура плавления низкая (32–60°C), а после перехода в твердое состояние они опять приобретают первоначальные свойства. Вследствие этого углеводородные смазки подходят для защиты машин от коррозии. Для смазывания не используются из-за низкой температуры плавления. Смазки этого типа отличаются низкой температурой каплепадения (45–70°C), высокими водо- и морозостойкостью, а также химической стабильностью, способностью после расплавления и последующего охлаждения восстанавливать структуру и свойства (например, пушечная, ЦИАТИМ-205). Они относительно дешевы, а их доля составляет около 14% от общего количества смазок.

3.2.3. Неорганические загустители

Смазки на неорганических загустителях получают загущением нефтяных и синтетических масел неорганическими соединениями: силикагелем (смазки ВНИИ НП – 279 или 282), асбестом, бентонитовыми

глинами (смазка ВНИИ НП – 273), сажей и т.д. Эти смазки стабильны при высоких температурах (200–300°C, в перспективе – при 400–600°C), обладают специфическими свойствами – стабильны при радиоактивном облучении и других сильных внешних воздействиях, составляют около 1,0–1,5% всех смазок. Они химически инертны, термо- и водостойки. Неорганические загустители состоят из мелких твердых частиц, пористая поверхность которых поглощает масло и превращает его в гель. Эти смазки не имеют четко выраженных точек каплепадения и плавления. Смазки, загущенные сажей и графитом, обладают очень высокой термостойкостью, особенно смазки на силиконовых маслах. Антикоррозионные и защитные свойства невысокие. Смазки данного типа используются для смазывания узлов трения при больших скоростях и значительных нагрузках.

3.2.4. Полимерные загустители

Полимочевинные смазки (поликарбамидные). Для их производства используют воскообразные олигомеры полимочевины. Полимочевинные смазки отличаются механической стабильностью, водостойкостью, термостойкостью. Точка плавления может превышать 220°C, при этом рабочая температура достигает 150°C. Обладают хорошими смазочными свойствами в парах трения металл – полимер. Отличаются долговечностью и пригодны для эксплуатации в условиях высоких скоростей и нагрузок. Применяются для смазывания шариковых шарниров равных угловых скоростей переднего ведущего моста.

Фторполимерные смазки (политетрафторэтиленовые – ПТФЭ, тефлоновые). Использование полимеров в качестве синтетических органических загустителей открыло новый этап в разработке смазок. ПТФЭ является одним из наиболее термически стойких загустителей, используемых при изготовлении высокотемпературных и долговечных смазок, у которых отсутствуют определенные точки плавления и каплепадения. ПТФЭ обладают низким коэффициентом трения, высокой химической инертностью, стойкостью к воздействию воды и других жидкостей.

С целью сохранения всех достоинств ПТФЭ смешивается с хорошими синтетическими маслами, например с перфторалкиловым маслом.

Смазки, загущенные полиэтиленом, из-за сравнительно низкой температуры плавления используются редко. Для полиэтилена характерны химическая стабильность и низкий коэффициент трения.

3.2.5. Модификация загустителей

Модификаторы структуры представляют собой поверхностно-активные вещества (кислоты, спирты и др.). Благодаря им повышается прочность пространственного структурного каркаса смазок.

Это один из путей улучшения смазок за счет дополнительной обработки существующих компонентов. В настоящее время хорошие результаты получают при модификации сульфоната кальция, мыл жирных кислот, неорганических загустителей.

3.3. Присадки и наполнители

В связи с ужесточением режимов эксплуатации узлов трения в большую часть современных пластичных смазок вводят добавки – присадки и наполнители.

Присадки обладают свойствами поверхностно-активных веществ. Это предопределяет их активность как в объеме смазки, так и на границе раздела дисперсная фаза – дисперсионная среда. Обычно это органические соединения. Они оказывают существенное влияние на формирование структуры и реологические свойства смазок. Основные присадки: антиокислительные (ионол), антикоррозионные (нитрованый окисленный петролатум), противоизносные (трикрезилфосфат), вязкостные (полиизобутилены) и т.д. Многие из них – многофункциональные, т.е. улучшают несколько свойств одновременно.

Присадки могут быть растворенными (функциональные присадки) или находиться в смазке в виде мелких частиц – взвеси (наполнители). Присадки улучшают не только антифрикционные, противоизносные, противозадирные свойства смазок, но и способствуют их адгезии к смазываемым поверхностям, повышают термическую и коллоидную стабильность, уменьшают коррозию и ржавление. Их вводят в масла в количестве 0,001–10% от массы смазки.

Функциональные присадки улучшают химическую стабильность, термостойкость, защитные и смазочные свойства. Особо важны противоизносные, разделяющие, антикоррозионные и противозадирные (EP – Extreme Pressure) присадки.

Подбор присадок при изготовлении смазок осуществляется с учетом назначения. Например, присадки, повышающие липкость, необходимые для смазывания шарниров, вредны в случае смазывания быстроходных подшипников.

Полимерные присадки улучшают индекс вязкости, адгезию, уменьшают износ и трение. Агенты липкости, например полиизобутилен, применяются для смазывания ходовой части. Для смазывания подшипников присадки прилипания должны применяться осторожно. Слишком липкая смазка выдавливается с трудом и может привести к перегреву подшипника.

Наполнители – это твердые высокодисперсные, нерастворимые в маслах вещества, не образующие в смазках коллоидной структуры, но улучшающие их эксплуатационные свойства (антифрикционные, герметизирующие и др.).

Наиболее часто применяют наполнители с низким коэффициентом трения: графит, сажа, дисульфид молибдена, тальк, слюда, нитрит бора и др.

В качестве наполнителей широко используют порошки меди, свинца, алюминия, олова, бронзы и латуни, которые обычно замешивают в готовую смазку в количестве от 1 до 30%, размер частиц до 10 мкм. Их действие больше всего проявляется в зонах интенсивного трения. Образуя самостоятельную фазу в смазках, наполнители способствуют упрочнению их граничных слоев.

Наполнители увеличивают прочность смазки, препятствуют выдавливанию ее из узлов трения и улучшают некоторые другие свойства. Большинство твердых присадок работоспособны до температуры 300–400°C.

Порошок меди в определенных условиях улучшает смазочные свойства, порошки цинка и свинца улучшают уплотнительные свойства смазок для резьбовых соединений. Поэтому такие наполнители применяют преимущественно в резьбовых, уплотнительных, а также антифрикционных смазках, используемых в тяжелонагруженных узлах трения скольжения (различного вида шарниры, некоторые зубчатые и цепные передачи, винтовые пары и др.).

Эффективно также использование в пластичных смазках композиций присадок и наполнителей.

Смазки, приготовленные на индивидуальных загустителях различного типа, обычно имеют характерную структуру, состоящую из анизо- или изометрических частиц. На структуру мыльных смазок оказывают также влияние и свойства дисперсионной среды, которые участвуют в построении структурного каркаса смазок. Видимая в электронный микроскоп структура наиболее типичных смазок показана на рис. 3.5 [5].

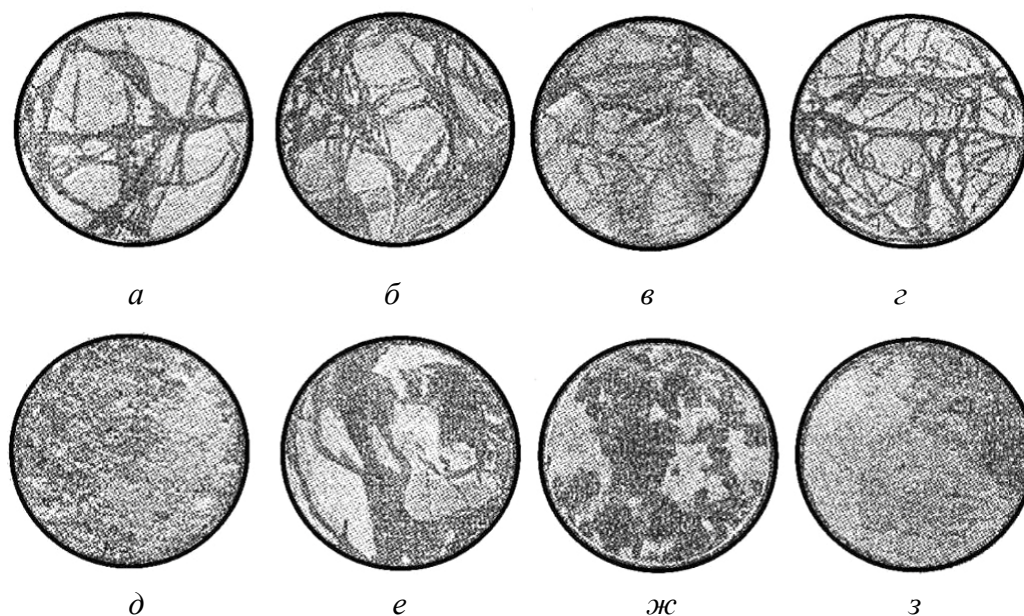


Рис. 3.5. Структура смазок,
 приготовленных на различных загустителях (увеличено в 20 000 раз):
a – жировой консталин; *б* – жировой солидол;
в – кальциевая комплексная смазка; *г* – литиевая смазка литол – 24;
д – алюминиевая смазка; *е* – кальциево-натриевая смазка 1-13;
ж – бентонитовая смазка; *з* – углеводородная смазка ПВК

Характер микроструктуры и объемно-механические свойства смазок существенно зависят от их состава и, особенно, от присутствия в них поверхностно-активных веществ. Немалое влияние на них оказывает технологический процесс приготовления. В процессе эксплуатации микроструктура и объемно-механические свойства смазок претерпевают существенные изменения.

4. ПРОИЗВОДСТВО ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

Процесс производства пластичных смазок – это процесс получения высокостабильных гелей с заданными свойствами. Поэтому технология изготовления смазок гораздо сложнее, чем топлива или масел.

Принцип приготовления смазок состоит в образовании структурного каркаса, образованного молекулами загустителя, включающего в свои ячейки дисперсионную среду (базовое масло). Для большинства смазок этот процесс состоит из нескольких стадий: дозировка сырья, приготовление загустителя, смешивание загустителя с маслом (варка смазки), охлаждение смазки, гомогенизация, деаэрация, расфасовка.

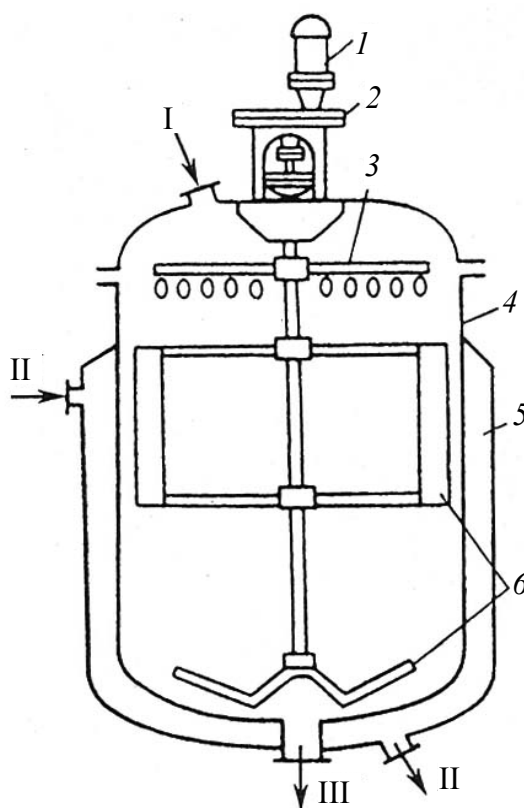
Технологические процессы производства смазок могут быть *периодическими* (обычно при выпуске большого ассортимента некрупными партиями) или *непрерывными* (целесообразны при выработке крупных партий одного сорта смазки).

Типичная *периодическая технология* приготовления наиболее распространенных мыльных смазок заключается в следующем. В варочный котел загружают 15–30% нефтяного масла и всю порцию жирового компонента. Ингредиенты при перемешивании нагревают до 70–80°C и добавляют водный раствор щелочи. При интенсивном перемешивании и температуре до 110°C происходит омыление жиров, после чего температуру повышают до 130°C для выпаривания лишнего количества воды. Затем смесь полученной мыльной основы и остатка масла нагревают до температуры плавления масла. По окончании варки мыльный расплав охлаждают. Режим охлаждения определяет пространственный каркас смазок: при быстром понижении температуры образуются мелкие, при медленном – крупные частицы загустителя. Смазки, полученные путем быстрого охлаждения расплава, отличаются большей прочностью. Наиболее упорядоченная и прочная структура пластичных смазок формируется в режиме изотермической кристаллизации.

Принципиальная технологическая схема *непрерывного производства* смазок: измельчение готового сухого мыла; приготовление суспензий его порошка в половине общего количества масла; нагревание суспензии до образования расплава, смешение последнего с остальным количеством нагретого масла; охлаждение мыльного расплава.

Технология получения углеводородных смазок намного проще, чем мыльных, и сводится в основном к сплавлению при перемешивании компонентов, выпарке воды и охлаждению готового расплава.

Для варки смазки используются варочные аппараты (котлы), оборудованные мешалкой и паровой рубашкой (для создания определенного теплового режима). Их оснащают быстро открывающимися люками, арматурой, теплоизмерительной и контрольно-измерительной аппаратурой (рисунок). В большинстве случаев в варочных котлах омыливаются жиры и диспергируются мыла, образующиеся в минеральном масле.



Варочный аппарат (котел):

- 1 – электродвигатель; 2 – редуктор;
 3 – пеногасительная лопасть; 4 – котел; 5 – паровая рубашка;
 6 – рамная мешалка; I – сырье; II – теплоноситель;
 III – продукт – пластичная смазка

В зависимости от применяемой аппаратуры производство смазок под давлением (используют герметичные автоклавы, в которых готовится мыльная основа смазки) подразделяется на одноступенчатый, двухступенчатый и трехступенчатый процессы. При одноступенчатом способе все стадии (дозировка, диспергирование мыла и охлаждение)

осуществляются в одном котле. При температуре 100°C варят кальциевые смазки, при 150°C – алюминиевые, при 200–210°C – натриевые и литиевые, при 100–120°C – углеводородные. Охлаждение смазки ведут или с резким перепадом температур, или медленно в варочных котлах либо в специальных аппаратах, так как от режима охлаждения зависят структура мыльного каркаса и качество смазки.

При производстве смазок для получения необходимой структуры следует тщательно выдерживать технологические режимы: порядок, температуру и продолжительность смешения компонентов, охлаждение и гомогенизацию смеси, введение присадок и наполнителей. Приготовление смазок различных типов имеет свои особенности. Мы рассмотрим общие основные вопросы.

Загустители. Для получения смазок могут использоваться готовые загустители (мыла и полимочевины) или приготавливаться *in situ*, то есть приготавливаться путем смешивания реагентов в дисперсионной среде.

Приготовление смазок из *готовых загустителей* заключается в интенсивном механическом диспергировании загустителя в масле. Для углеводородных и некоторых мыльных смазок бывает достаточно простого перемешивания при нагревании. Такие загустители, как глины, аэросил, требуют более активного воздействия, к которому относится циркуляция смеси по контуру, промежуточная гомогенизация.

Приготовление *загустителя in situ* происходит в процессе смешения реагентов в дисперсионной среде или ее части. Например, для приготовления мыла в реактор загружают дисперсионную среду, жиры и водный раствор (или суспензию) гидроксида металла. Смесь нагревают до 200 и более градусов и перемешивают в течение заданного времени (10–40 мин). В реакторе происходит омыление жира с образованием мыла и глицерина. Глицерин остается в смазке, а избыток воды выпаривается. Для этого используются специальные выпарные аппараты. Полностью воду из смазки удалить нельзя, и поэтому часть ее (до нескольких процентов на смазку) остается. Иногда это оказывается полезным. Например, вода в гидратированных кальциевых смазках служит стабилизатором их структуры.

Другим примером приготовления загустителя *in situ* может служить получение полимочевины. Для этого в дисперсионной среде последовательно смешивают амины и изоцианаты, наблюдая в процессе реакции между ними интенсивное загущение смеси с выделением

тепла. Завершается стадия диспергирования загустителя образованием гомогенного расплава или тонкой суспензии.

Охлаждение – стадия, на которой начинается образование структуры смазки. При охлаждении загуститель кристаллизуется в виде сетки мелких волокон. Оно начинается в реакторе и продолжается в специальных скребковых холодильниках. Существуют другие способы охлаждения, например, в тонком слое на вращающихся барабанах. В конце процесса охлаждения в смазку вводят присадки и наполнители.

Гомогенизация смазки завершает образование ее структуры. Она заключается в интенсивном механическом воздействии на гель. Простейшим гомогенизатором являются трехвальцевые краскотерки, в которых через зазоры между вальцами пропускается смазка. Более эффективны клапанные и роторно-щелевые гомогенизаторы, в которых смазка пропускается с большой скоростью под давлением через малые регулируемые зазоры. Существуют гомогенизаторы и других типов. Например, для повышения стабильности охлажденных после приготовления пластичных смазок их продавливают через узкие кольцевые отверстия под давлением 20–25 МПа или щелевые зазоры в полость специального аппарата, из которого непрерывно откачивают воздух.

Деаэрация – стадия удаления воздуха из готовой смазки. Улучшает ее структуру и внешний вид.

Фильтрация исходных компонентов и готовых смазок также необходима для получения качественного продукта с хорошими антифрикционными характеристиками. Фильтрация смазок – процесс достаточно трудный. Для этого смазки пропускают через металлические сетки, патронно-щелевые фильтры или фильтры других, более сложных конструкций.

5. ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ: СВОЙСТВА, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ

В процессе работы смазка подвергается воздействию повышенных температур, скоростей и нагрузок, а также воздействию различных факторов окружающей среды (кислород воздуха, вода, пары коррозионно-активных соединений, радиация и др.). Это сопровождается термическим разложением, термоокислительными процессами и полимеризацией, которые интенсифицируются деформацией сдвига и каталитическим действием ювенильных поверхностей трения. Все это в совокупности приводит к «старению» смазок и к ухудшению их эксплуатационных свойств. Расход смазок в процессе работы обусловлен также испарением дисперсионной среды, механической деструкцией дисперсной фазы, выделением масла из смазки и вытеканием его из узла трения.

Основные характеристики смазок, по которым судят об их эксплуатационных свойствах и которыми руководствуются при выборе смазок для конкретных узлов трения, установлены ГОСТ 4.23–83 «Система показателей качества продукции. Нефтепродукты. Смазки пластичные. Номенклатура показателей». Этот стандарт устанавливает обязательную номенклатуру показателей и признаков качества смазок, которые необходимо включить в научно-техническую документацию (НТД) при их разработке. Реологические характеристики (прочностные и вязкостные), водостойкость, испаряемость, окисляемость, антикоррозионные, противоизносные и другие свойства характеризуют работоспособность смазок. Для определения стабильности смазок оценивают их коллоидную, механическую и термическую стабильности.

В процессе изготовления смазок контролируют показатели, определяющие воспроизводимость их свойств – пенетрацию и температуру каплепадения. По содержанию воды, свободных щелочей, кислот и механических примесей оценивают пригодность смазок к применению.

Установлены показатели качества, обязательные для всех или отдельных видов смазок. К первым относят внешний вид, содержание воды и механических примесей, испытание на коррозию; ко вторым – температуру каплепадения, предел прочности, вязкость, коллоидную, механическую и химическую стабильность, термоупрочнение, испаряемость, содержание органических водорастворимых кислот и свободной щелочи, показатели защитных (от коррозии), противоизносных и противозадирных свойств, адгезию и растворимость в воде.

5.1. Внешний вид и текстура смазок

Внешний вид смазки оценивается визуально и показывает ее состояние. Поверхность смазки, особенно вновь образованная, может быть: ровная и однородная, шероховатая, гранулированная, изломанная, с выделившимся маслом, липкая, определенного цвета и флуоресцирующая в отраженном свете, блестящая или тусклая.

Текстура смазки оценивается на ощупь и характеризует ее структуру. Текстура может быть: мягкая и пластичная, хрупкая и ломкая, маслоподобная, волокнистая, в форме длинных и коротких волокон, эластичная и упругая, тягучая, но не образующая нитей. Текстура зависит от загустителя, вязкости жидкой фазы, соотношения компонентов, присадок и способа изготовления смазки.

Стандартные методы оценки структуры отсутствуют. Приблизительная оценка проводится визуально, при наблюдении отрыва друг от друга двух пластинок, склеенных смазкой. При этом смазка может вытягиваться длинными или короткими волокнами, ровной или шероховатой разорванной поверхностью и т.д.

Загуститель образует отдельную волокнистую дисперсную фазу. Волокна переплетаются между собой и, соединяясь структурными связями, создают определенную пространственную структуру каркаса, впитавшую в себя масло. Волокна могут быть короткими или длинными и с разной степенью переплетения. От структуры каркаса и длины волокон зависят механические свойства: густота, структурная и рабочая стабильность, вытекание масла. Если длина волокон или частиц мыла меньше длины световой волны, свет не рассеивается и смазка прозрачная. Например, алюминиевая смазка, состоящая из сферических частиц алюминиевого мыла. Неорганические загустители, особенно бентониты, могут иметь пластинчатую структуру, которая образует каркас, напоминающий карточный домик.

5.2. Показатели работоспособности

5.2.1. Предел прочности на сдвиг и эффективная вязкость

Предел прочности на сдвиг и эффективная вязкость – показатели механических свойств смазок. Предел прочности – это минимальное удельное напряжение (Па), которое нужно приложить к смазке, чтобы изменить ее форму и сдвинуть один слой смазки относительно другого.

Он определяет практическую границу перехода смазки от состояния покоя к пластичному течению при приложении сдвигового напряжения, т.е. происходит разрушение структурного каркаса смазки в результате сдвига одного ее слоя относительно другого и она приобретает текучесть. Наличие у пластичных смазок предела текучести отличает их от других видов смазочных материалов. При напряжении сдвига выше предела прочности смазки начинают течь. При меньших нагрузках пластичные смазки сохраняют свою внутреннюю структуру и упруго деформируются подобно твердым телам, а при больших давлениях структура разрушается и смазка ведет себя как вязкая жидкость.

Предел прочности характеризует способность смазок удерживаться в негерметизированных узлах трения, противостоять сбросу с движущихся деталей под влиянием инерционных сил и удерживаться на наклонных и вертикальных поверхностях, не стекая и не сползая. С его помощью оценивают эксплуатационные свойства и качество смазок, загущающий эффект и концентрацию используемого в них загустителя. При невысоком пределе прочности смазки плохо удерживаются в негерметизированных узлах трения, а при высоком – не поступают к трущимся поверхностям даже при достаточном количестве смазочного материала в механизме.

Поскольку предел прочности с ростом скорости нагружения увеличивается, то его определяют при скоростях деформации ниже $6 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$.

При рабочей температуре узла предел прочности не должен превышать 300–500 Па, а минимальное его значение при наибольшей температуре в рабочей зоне должно быть не ниже 100–200 Па. При температуре 20°C предел прочности должен быть равен 300–1500 Па.

Предел прочности зависит от температуры. В табл. 5.1 приведены результаты определения предела прочности некоторых смазок при различных температурах на приборе К-2. Как видно по приведенным в табл. 5.1 показателям, смазки заметно отличаются друг от друга.

По величине предела прочности в рабочем интервале температур судят о поведении смазки в узлах трения. Температура, при которой предел прочности становится равным нулю и смазка переходит из пластичного в жидкое состояние, определяет верхний температурный предел ее применения. Смазки с меньшим пределом прочности легче поступают в зазор между поверхностями трения и более эффективно

снижают износ, чем аналогичные смазки с высоким пределом прочности, но они хуже удерживаются в зоне трения, так как выдавливаются и сбрасываются под действием статических, динамических нагрузок и инерционных сил.

Таблица 5.1

Влияние температуры на предел прочности смазок

Смазка	Предел прочности τ , гПа при температуре, °С				τ_0 / τ_{50}
	0	25	50	80	
Солидол Ж	12,9	3,9	2,7	–	4,8
Солидол С	13,5	3,6	2,2	0,5	5,1
1-13 жировая	10,0	2,1	1,4	0,4	7,1
ЯНЗ-2	12,1	3,5	2,1	1,1	11,0
Литол-24	13,8	7,1	4,5	2,5	3,0

Для каждой смазки существует также минимальная температура, при которой вследствие возросшего внутреннего трения мощность привода становится недостаточной для приведения механизма в движение или выведения его на нужный скоростной режим. Эту температуру и принимают за нижний предел работоспособности смазки применительно к данному механизму. Особенностью пластичных смазок является меньшее, чем у исходных масел, изменение вязкости при изменении температуры.

Стандартные методы предусматривают определение предела прочности смазок на сдвиг τ в капиллярных и ротационных пластомерах (ГОСТ 7143–73).

Пластомер – прибор для установления предельного напряжения сдвига пластичных смазок. Наиболее часто этот показатель определяют на капиллярном пластомере К-2.

Пластомер К-2 служит для определения предела прочности пластичных смазок по ГОСТ 7143–73. Металлический капилляр, имеющий внутреннюю винтовую нарезку, заполняют смазкой (рис. 5.1). Нарезка исключает проскальзывание смазки вдоль стенок при приложении давления. Нижнюю часть капилляра соединяют трубкой с масляным резервуаром и манометром, а верхнюю оставляют открытой. Масляный резервуар и трубку заполняют маловязким маслом. Капилляр охлаждают или нагревают до заданной температуры, затем нагревают масляный резервуар; при этом давление в системе повышается и передается на смазку в капилляре. Давление, при котором смазка выдавливается из капилляра, и является показателем предела ее прочности.

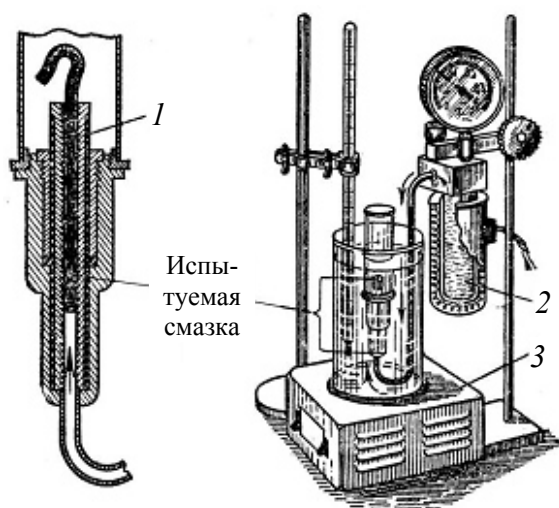


Рис. 5.1. Пластомер К-2:
1 – капилляр; 2 – масляный резервуар;
3 – электропечь

На приборе К-2 можно определять предел прочности смазки при температуре от -60 до $+130^{\circ}\text{C}$.

Пластовискозиметр – прибор для определения показателей механических свойств пластичных материалов (эффективной вязкости и предела прочности). Одной из его разновидностей является ротационный пластовискозиметр, который состоит из двух соосно расположенных цилиндров (рис. 5.2), в кольцевой зазор между боковыми поверхностями которых может быть

введен испытуемый материал. Наружный цилиндр 2 жестко связан с приводом, от которого ему сообщается равномерное вращение с различными скоростями. Внутренний цилиндр 1 покоится на опоре, позволяющей ему практически без трения поворачиваться вокруг своей оси.

При введении в зазор испытуемого материала вращение от наружного цилиндра передается к этому материалу, который движется с разными скоростями, убывающими по толщине зазора в направлении к внутреннему цилиндру. Из-за разности скоростей в смежных слоях испытуемого вещества будет иметь место непрерывный сдвиг этих слоев друг относительно друга или в зазоре возникнет *деформация сдвига*, вслед за которой немедленно появляется сила, стремящаяся повернуть внутренний цилиндр. Эта сила измеряется динамометром, подключенным по касательной к наружной поверхности внутреннего цилиндра, т.е. на радиусе R_1 (точка А на рис. 5.2). Фиксируемая динамометром сила зависит от свойств испытуемого материала, скорости вращения наружного цилиндра и от размеров прибора.

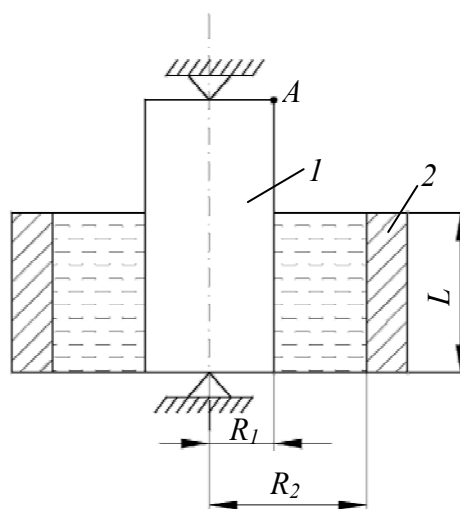


Рис. 5.2. Принципиальная схема ротационного пластовискозиметра

Чтобы исключить влияние геометрических размеров пластови-
скозиметра на характеристику испытываемого материала, измерения,
полученные непосредственно из опыта, пересчитывают в следующие
показатели:

– *напряжение сдвига* τ , равное силе, с которой испытываемый
материал действует на единицу рабочей поверхности внутреннего
цилиндра, т.е.

$$\tau = \frac{P}{2\pi R_1 L},$$

где P – сила, измеренная на радиусе R_1 ; L – длина рабочей части ци-
линдра;

– *скорость деформации сдвига* D , численно равную (приблизленно)
отношению линейной скорости внутренней поверхности наружного
цилиндра к ширине зазора, т.е.

$$D = \frac{\omega R_2}{(R_2 - R_1)},$$

где ω – угловая скорость наружного цилиндра (следует иметь в виду,
что скорость деформации сдвига размерностью с^{-1} иногда называют
градиентом скорости);

– *деформацию сдвига* (относительную деформацию сдвига) v , рав-
ную произведению скорости деформации сдвига на время t , т.е. $v = D \cdot t$.

На рис. 5.3 представлены результаты испытания в ротационном
пластови-скозиметре масла (прямая 1) и приготовленной из него смаз-
ки (кривая 2). Если в прибор ввести масло и начать вращать наружный
цилиндр, то в масле возникает напряжение сдвига τ , которое, быстро
достигая значения $\tau'_{\text{уст}}$, остается постоянным в течение любого срока
при неизменных условиях опыта.

Иная картина наблюдается при испытании смазки в аналогичных
условиях. С началом вращения наружного цилиндра напряжение, как
и на масле, растет, но до значительно большей величины. Начальный
прямолинейный участок кривой соответствует упругой деформации,
которая полностью снимается. Дальнейшее увеличение деформации
при $D = \text{const}$ приводит к разрыву связей между структурными эле-
ментами каркаса.

Однако этому процессу предшествует тиксотропное восстано-
вление связей при сближении частиц дисперсной фазы на расстояние дей-
ствия межмолекулярных сил. Разупрочнение смазки продолжается до
тех пор, пока приложенное напряжение обеспечивает более высокую

скорость разрушения в сравнении со скоростью восстановления. При некоторой величине деформации γ , равной $\gamma_{пч}$, напряжение достигает максимума τ_{max} (кривая 2 на рис. 5.3), которое характеризует прочность структурного каркаса смазки и является ее *пределом прочности* – $\tau_{пч}$.

Дальнейшее деформирование при $D = const$ вызывает необратимое разрушение каркаса и начинается *течение смазки* (она ведет себя как жидкость), идущее вначале при непрерывном уменьшении τ (правый участок кривой 2 на рис. 5.3). С достижением равновесия между процессами разрушения и восстановления связей, когда γ достигает $\gamma_{уст}$, снижение τ заканчивается, а его значение неограниченно долго сохраняется постоянным (установившимся) на уровне $\tau'_{уст}$ (правый горизонтальный участок кривой 2).

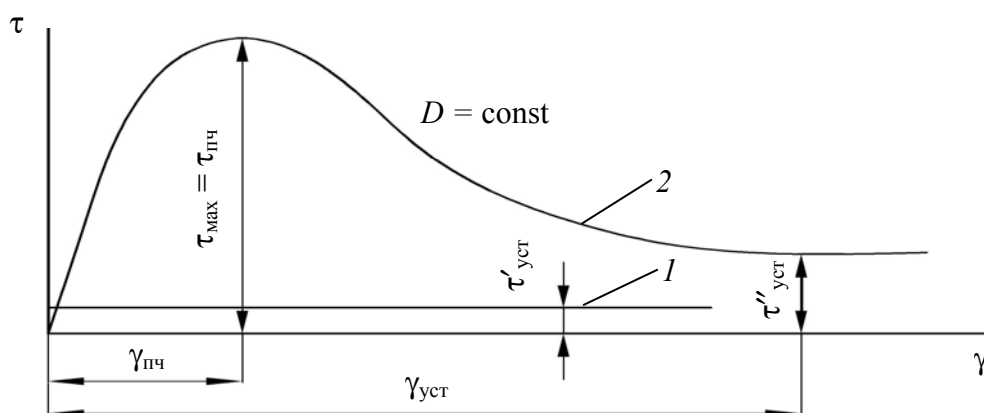


Рис. 5.3. Зависимость напряжений сдвига от деформации масла (1) и приготовленной из него смазки (2): τ_{max} – максимальное напряжение сдвига, соответствующее пределу прочности на сдвиг ($\tau_{пч}$); $\tau_{уст}$ – напряжение сдвига, соответствующее установившемуся течению; $\gamma_{пч}$ и $\gamma_{уст}$ – соответствующие деформации

Таким образом, *предел прочности смазки представляет собой минимальное напряжение сдвига, при котором начинается течение смазки из-за наступающего разрушения каркаса, образованного загустителем (на кривой это $\tau_{пч}$).*

При течении масел, не содержащих твердой фазы, обнаруживается прямо пропорциональная зависимость между напряжением и скоростью деформирования, аналитически выражающаяся уравнением Ньютона $\tau = \eta \cdot D$, где коэффициент пропорциональности η не зависит от D (градиент скорости) и называется *коэффициентом динамической вязкости* или просто *динамической вязкостью*. Динамическая вязкость является постоянной величиной жидкости, однозначно характеризующей механические свойства ее при данной температуре.

Иное дело получается на смазках, содержащих, кроме масел, еще пронизывающий их каркас из загустителя. В этом случае при течении смазки в величину $\tau_{уст}$, кроме сопротивления, вызванного относительным перемещением слоев масла, имеющегося в каждой пластичной смазке, включаются еще три составляющие – сопротивление разрыва связей между частицами загустителя, сопротивление чисто механического зацепления друг за друга обломков каркаса и сопротивление, связанное с обтеканием маслом самого каркаса или его обломков. Наличие названных дополнительных сопротивлений приводит к тому, что $\tau''_{уст}$ (см. рис. 5.3) становится значительно больше $\tau'_{уст}$ (при малых D в сотни и тысячи раз). Кроме того, эти дополнительные сопротивления нарушают прямо пропорциональную зависимость между $\tau''_{уст}$ и D .

Отношение $\tau''_{уст}$ к D для смазок оказывается зависимым от D . Его, в отличие от аналогичного отношения, вычисляемого для жидкостей ($\tau'_{уст}$ к D), называют не динамической вязкостью, а *эффективной динамической вязкостью* или *эффективной вязкостью*. Таким образом, эффективной называют величину вязкости, определенную при заданных значениях скорости деформирования и температуре. Пластичные смазки, в отличие от жидкости, обладают структурной вязкостью, которая зависит не только от температуры, но и от градиента скорости сдвига. Увеличение последнего приводит к снижению вязкости при аналогичной температуре (рис. 5.4).

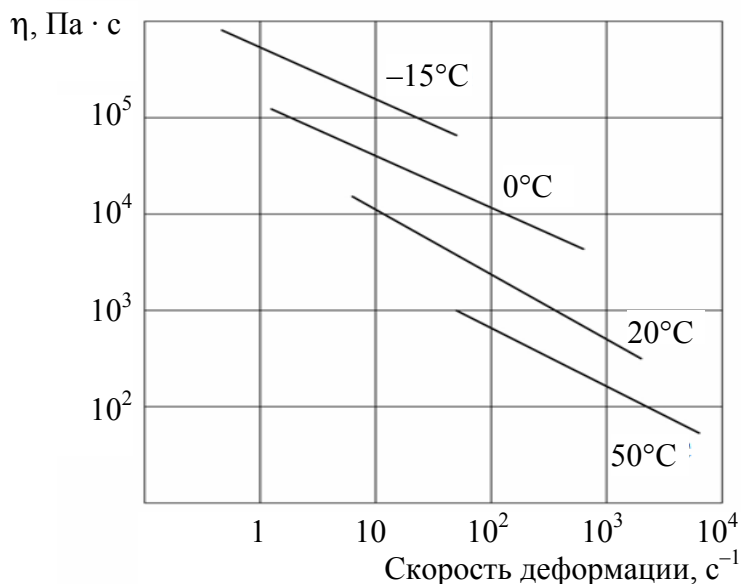


Рис. 5.4. Зависимость вязкости солидола С от скорости деформации

Из рис. 5.4 видно, что эффективная вязкость смазки при постоянной температуре является переменной величиной и зависит от скорости деформирования. Для характеристики этого свойства и вводят понятие «эффективная вязкость смазки», под которым подразумевают вязкость ньютоновской жидкости, оказывающей при данном режиме течения такое же сопротивление сдвигу, что и смазка.

Поэтому характеристику вязкостных свойств смазки представляют в виде зависимости $\eta_{\text{эф}}$ от D , либо каждое численное значение эффективной вязкости $\eta_{\text{эф}}$ сопровождается указанием градиента скорости D , при котором она определялась. Установлено, что с ростом скорости деформирования, эффективная вязкость пластичных смазок, характеризующая их сопротивление течению, асимптотически приближается к вязкости дисперсионной среды (содержащегося в ней масла) (рис. 5.5). На практике это означает, что с повышением скорости, энергия, расходуемая на перемещение объема смазки или смазанных ею деталей, будет повышаться гораздо медленнее, чем при использовании масел.

Величиной эффективной вязкости определяются затраты энергии на относительное перемещение смазанных деталей, на прокачивание смазок по трубопроводам и по смазочным каналам. Фактически эффективная вязкость пластичных смазок определяет пусковые характеристики механизмов, легкость подачи и заправки ее в узлы трения. Из двух смазок, имеющих одинаковый предел прочности, будет

лучше та, у которой при прочих равных условиях эффективная вязкость меньше.

Вязкость пластичных смазок определяют по ГОСТ 7163–84 в автоматических капиллярных вискозиметрах АКВ при температурах от -60 до $+130^{\circ}\text{C}$. Настоящий стандарт устанавливает метод определения эффективной вязкости пластичных смазок и динамической вязкости нефтепродуктов, имеющих вязкость от 1 до $6 \cdot 10^3$ Па·с.

Для пластичных смазок рекомендуется нормировать вязкость при скорости деформации 10 с^{-1} .

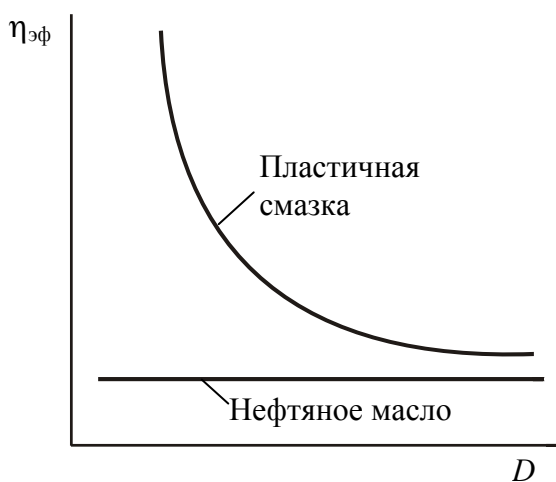


Рис. 5.5. Зависимости вязкости масла и эффективной вязкости приготовленной из него смазки от скорости деформации (градиента скорости)

Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) вискозиметра показаны на рис. 5.6. Смазка 2 под действием сжатой пружины продавливается штоком 3 из цилиндрической камеры через капилляр 1. На вращающемся с постоянной скоростью барабане 4 карандаш 5 вычерчивает кривую изменения внутреннего трения смазки в координатах давление пружины – время. Найденное из кривой напряжение на стенках капилляра τ делят на градиент скорости сдвига D и определяют вязкость смазки. Для определения вязкостной характеристики требуется 15 г смазки и около 40 мин.

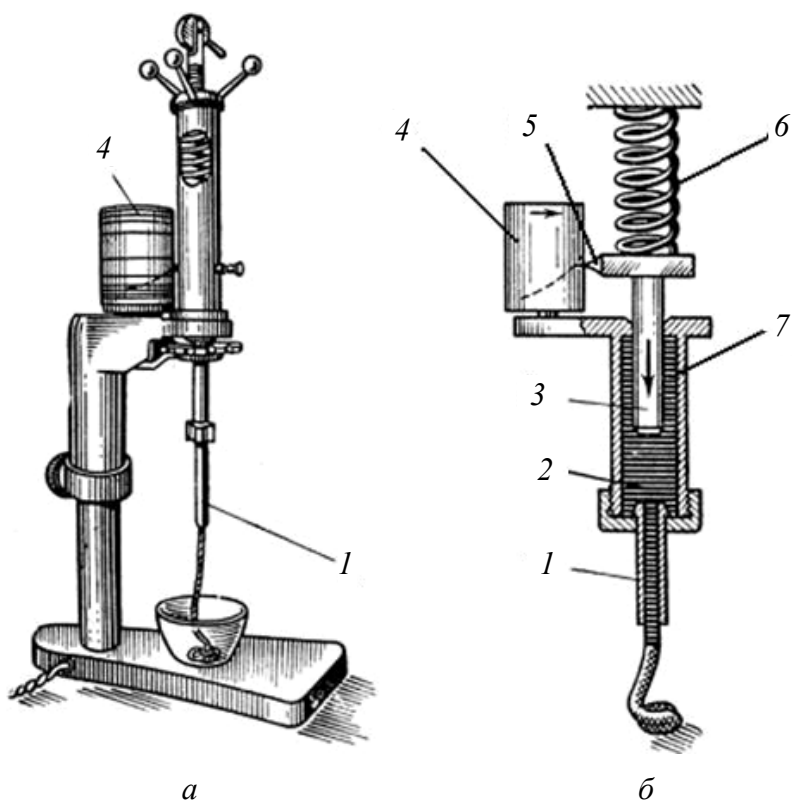


Рис. 5.6. Вискозиметр АКВ:
 1 – капилляр; 2 – смазка; 3 – шток; 4 – барабан;
 5 – карандаш; 6 – пружина; 7 – камера

Динамическая вязкость смазки определяется стандартным методом по ASTM D 1092 (в интервале температур от -54 до $+38^{\circ}\text{C}$) или ротационным конусным вискозиметром Нааке (рис. 5.7) при температуре 25°C и скорости сдвига 300 с^{-1} .

Вязкостные характеристики относятся к важнейшим эксплуатационным показателям пластичных смазок. Пусковые характеристики механизмов, потери при работе различных узлов трения

во многом зависят от вязкости смазок, которая в условиях минимальной рабочей температуры и скорости деформации 10 с^{-1} не должна превышать $15\text{--}20 \text{ кПа}\cdot\text{с}$.

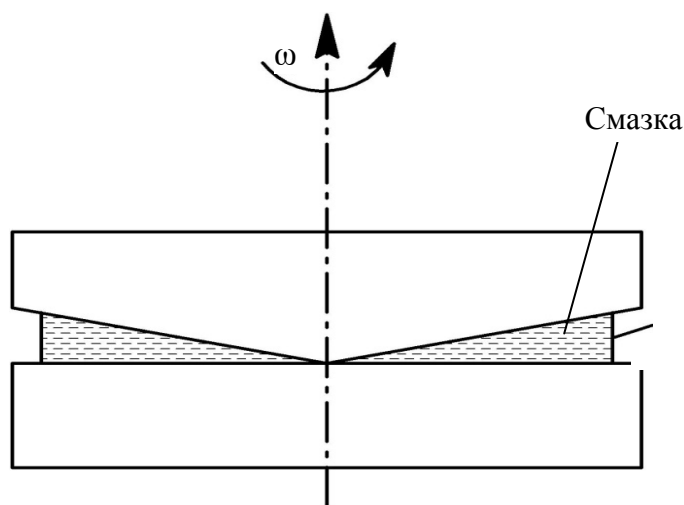


Рис. 5.7. Схема определения динамической вязкости смазок

По абсолютной величине вязкостное сопротивление пластичных смазок при течении выше, чем их дисперсионных сред. Однако характерная особенность смазок состоит в том, что с увеличением градиента скорости сдвига их вязкость убывает, тогда как у масел она остается без изменения (см. рис. 5.5).

Поскольку в процессе механического воздействия структура смазок разрушается, а при уменьшении интенсивности такого воздействия она восстанавливается, смазки как бы автоматически приспособляются к скоростному режиму работы узла, стабилизируя условия его работы с точки зрения расхода энергии.

Другая характерная особенность пластичных смазок – меньшее, чем у исходных масел, изменение вязкости при изменении температуры. Лучшие вязкостно-температурные свойства имеют смазки, приготовленные на маслах, у которых зависимость вязкости от температуры меньше.

Иными словами, маловязкие масла с точки зрения вязкостно-температурных свойств в качестве дисперсионной среды пластичных смазок более предпочтительны, чем аналогичные им по природе высоковязкие.

На рис. 5.8 приведена зависимость установившегося момента сопротивления подшипников от вязкости дисперсионной среды.

Повышенная вязкость приводит к повышению момента сопротивления и энергетических потерь.

Суммировав все сказанное в отношении предела прочности и эффективной вязкости, можно сформулировать требования к механическим свойствам смазок в следующем виде: *пластичные смазки должны обладать определенным пределом прочности и как можно меньшей эффективной вязкостью при заданных условиях использования.*

Для определения вязкости от 1000 Па·с (при низких температурах) и выше, применяются ротационные вискозиметры типа РВ.

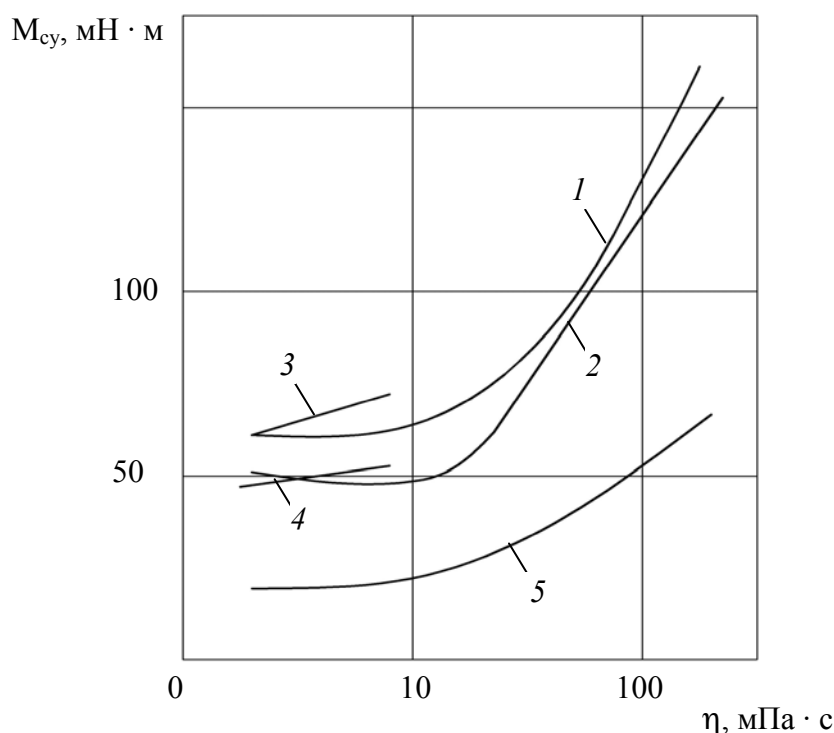


Рис. 5.8. Зависимость установившегося момента сопротивления вращению (M_{cy}) роликового конического (кривые 1, 2, 3, 4) и шарикового (кривая 5) подшипников от вязкости дисперсионной среды η при температуре 50°C для литиевых (кривые 1, 2, 5) и натриевых (кривые 3, 4) смазок при частоте вращения 100 (кривые 1, 3) и 500 (кривые 2, 4, 5) мин^{-1}

5.2.2. Смазывающие свойства смазок

Смазывающие свойства смазок, в отличие от масла, следует понимать шире, чем способность уменьшать трение и изнашивание. В смазке во время эксплуатации накапливаются продукты износа и другие посторонние загрязнения, которые не должны ухудшать смазывающих свойств.

Трение и изнашивание при смазывании пластичными смазками зависят от вязкости и сорта базового масла, структурных характеристик и консистенции смазки, природы и свойств загустителей, присадок, наполнителей, адгезии и др.

Адгезия (липкость) способствует прилипанию смазки к контактирующим поверхностям. Она влияет на долговременное сохранение смазки в зонах смазывания. Увеличение липкости достигается путем применения присадок, полимеров большой молекулярной массы либо базовым маслом повышенной вязкости.

Необходимые защитные свойства смазок обеспечиваются подбором загустителя, дисперсионной среды, присадок и введением в них эффективных ингибиторов коррозии. В пластичных антифрикционных смазках ингибиторы коррозии применяются редко. Они входят в состав рабоче-консервационных смазок (Лита, Зимол, Литол-24РК).

В автомобилях и тракторах наблюдаются два основных вида трения – качения в подшипниках колес и скольжения в узлах ходовой части (шарнирные соединения и др.).

В подшипниках качения трение при сухих поверхностях наименьшее, а в случае использования густой смазки оно значительно возрастает. Густая смазка при высокой скорости качения вызывает потери энергии и перегрев подшипников. Для смазок подшипников качения важным свойством является способность подавлять питтинг (выкрашивание).

По сравнению с шариковыми подшипниками в роликовых деформация сдвига в 4 раза больше, поэтому смазки для роликовых подшипников должны обладать повышенной механической стабильностью.

В связи со сложностью физико-химических и механо-динамических процессов, происходящих в зоне трения, в настоящее время отсутствуют методы и критерии, которые позволили бы однозначно оценивать эффективность смазочного материала как антифрикционного и противоизносного средства. Обычно смазочную способность оценивают по коэффициенту трения, величине износа, по критическим значениям нормальной нагрузки или температуры разрушения смазочной пленки, а также по производным от нагрузки и износа показателям, например по величине индекса задира. С этой целью широко используются машины трения.

Существует два принципиально отличных метода оценки смазочной способности на машинах трения: коэффициент трения или показатели износа измеряют в зависимости от температуры или нагрузки.

По стандартному методу ГОСТ 9490–75 испытания смазочных свойств на четырехшариковой машине проводят при постоянной температуре и ступенчатом повышении нагрузки. Смазочные свойства смазок, так же как и масел, оценивают совокупностью показателей: критической нагрузкой заедания $P_{кз}$, критической нагрузкой сваривания $P_{св}$ и индекса задира I_3 . Противоизносные свойства часто оценивают по величине диаметра пятна износа $D_{и}$ при заданных времени, температуре испытания и постоянной рабочей нагрузке.

На четырехшариковой машине определяют и нагрузку сваривания, которая характеризует антизадирные (EP – Extreme Pressure) свойства пластичной смазки. Данный метод испытаний регламентирован стандартом DIN 5151 350/4. Сущность способа заключается в следующем. Три стальных шарика помещаются в чашку и смазываются исследуемой смазкой, а четвертый устанавливается сверху между ними. Этот шарик вращается относительно трех шариков с заданной скоростью. Нагрузка увеличивается с определенным шагом до тех пор, пока вращающийся шарик не приварится к трем неподвижным шарикам (рис. 5.9). Данное испытание позволяет определить давление, характеризующее антизадирные свойства пластичной смазки, которая относится к классу EP при нагрузке сваривания свыше 2600 Н.

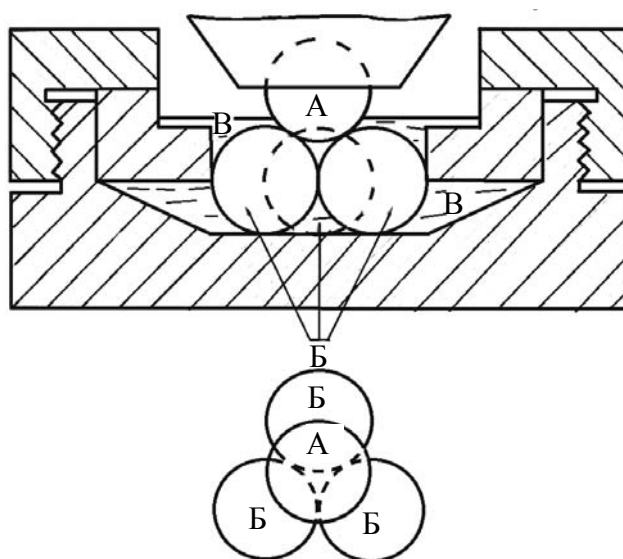


Рис. 5.9. Схема четырехшариковой машины трения:
A – верхний шарик, закрепленный в шпинделе; *Б* – нижний шарик;
В – испытуемая смазка

Испытания на износ также проводятся на 4-шариковой машине. Нагрузка величиной 1400 Н прикладывается на четвертый шар

в течение 1 мин. Затем измеряется износ нижних шариков. Стандартные испытания предполагают величину нагрузки 400 Н. Чтобы приблизить условия испытаний к реальным условиям работы подшипниковых узлов в SKF, было принято решение увеличить нагрузку до 1400 Н.

Испытания на машинах трения носят условный характер, так как не моделируют ни одного реального случая работы узла. Тем не менее такие испытания позволяют сравнивать смазочные свойства испытуемых и эталонных материалов в стандартных условиях и оценивать влияние на них состава, а также в некоторой степени прогнозировать поведение смазочного материала в условиях эксплуатации.

Методами определения смазывающих свойств при трении скольжения является оценка износа пары трения сталь – сталь на четырехшариковой машине трения, при трении качения – испытания FAG FE 8 или FAG FE 9 по стандартам DIN (определяется износ конусного радиального подшипника при определенных условиях) или испытания SKF Emcor, SKF R2F по стандартам DIN (оценивается износ подшипников качения под действием разных нагрузок, скоростей и температур).

Испытательная машина SKF R2F позволяет оценивать работоспособность при высоких температурах и смазочную способность пластичных смазок, имитируя условия крупногабаритных подшипников. Тесты проводятся в двух различных условиях: тест А при комнатной температуре, а тест В при 120°C. Положительный результат теста А означает, что пластичная смазка обеспечивает смазывание крупногабаритных подшипников при нормальной температуре и малой вибрации. Положительный результат теста В при 120°C означает, что пластичная смазка обеспечивает смазывание крупногабаритных подшипников и при повышенной температуре.

«SKF AB» (SKF), «FAG Kugelfischer Georg Schaefer KG» (FAG) – крупнейшие международные компании по производству подшипников с головными организациями в Швеции и Германии. Разработанные ими методы оценки качества смазок достаточно информативны и хорошо определяют уровень качества и пригодность использования их в подшипниках качения.

Результаты этих испытаний обычно указываются в описаниях качества смазок европейских компаний.

5.2.3. Испаряемость

Испаряемость – важнейший показатель физической стабильности смазок, от которого зависят сроки хранения и их поведение в эксплуа-

тации. Ею оценивают количество масла, испарившегося из смазки за определенный промежуток времени при максимальной температуре применения. Это свойство определяется испаряемостью наиболее летучих компонентов и, в первую очередь, дисперсионной среды смазок. Повышение температуры, наличие разрежения атмосферы, воздушных потоков над смазанной поверхностью, уменьшение толщины смазочного слоя – все это способствует увеличению испаряемости смазок, поскольку обуславливает рост упругости паров и облегчение диффузии летучих компонентов через слой смазки.

Испаряемость дисперсионной среды в свою очередь является функцией ее фракционного состава и химической природы. Смазки, полученные на более вязких и одинаковой природы маслах, имеют меньшую испаряемость. Из смазок, приготовленных на маловязких маслах, более значительные потери от испарения дают те, в которых использовались масла из нефтей нафтенового основания, а меньшие – на маслах из парафинистых нефтей. Менее ощутимы различия в испаряемости смазок, приготовленных на тяжелых маслах одинаковой вязкости, но из разных нефтей.

Тип загустителя и особенности строения структурного каркаса в обычных условиях на испаряемости смазок заметно не отражаются.

Следствием испарения масла является увеличение концентрации загустителя, повышение их предела прочности с вытекающими последствиями. В тяжелых случаях это потеря смазками пластичности, растрескивание и отставание смазочного слоя от поверхностей, резкое ухудшение низкотемпературных, смазочных, защитных свойств и герметизирующей способности.

Твердые частицы загустителя, потерявшие часть масла, могут забивать мазепроводы, выводить из строя подшипники качения, загрязнять механизмы и служить причиной нарушения их нормальной работы.

Повышению работоспособности ответственных узлов трения автомобиля и трактора, эксплуатируемых при повышенных температурах, должны способствовать максимальная герметизация таких узлов и использование в них малоиспаряющихся смазок.

Испаряемость смазок оценивается при помощи разнообразных методов по величине давления насыщенных паров или по количеству масла, испарившегося за единицу времени. Определения производят в стандартных условиях: задается давление, температура, величина навески и толщина слоя смазки, площадь испарения, материал и конфигурация смазываемой поверхности.

В СНГ определение испаряемости смазок осуществляется по ГОСТ 9566–74. Сущность метода заключается в определении потери массы смазки из чашечки-испарителя в заданных условиях.

Три-пять чашек-испарителей, заполненных вровень с бортами, выдерживают один час на плитке специального термостата (рис. 5.10) при заданной, обычно предельно допустимой для этой смазки температуре.

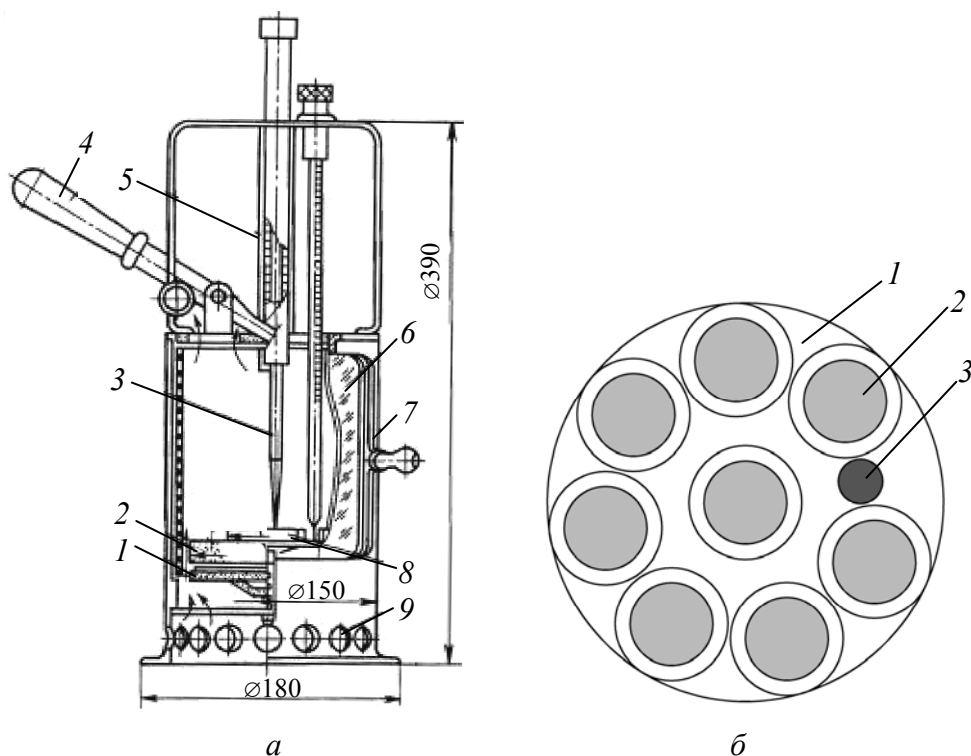


Рис. 5.10. Схема термостата:

- a* – общий вид: 1 – электроподогревающий элемент;
 2 – нагревательная пластина; 3 – шток; 4 – рукоятка; 5 – пружина;
 б – стеклянная дверца; 7 – металлический корпус; 8 – стальной диск;
 9 – отверстия; б – схема рабочей части прибора: 1 – нагреваемая пластина;
 2 – чашечка-испаритель; 3 – гнездо для термометра

Взвешиванием определяют среднюю потерю массы. Испаряемость смазки менее 1% оценивается как «отсутствие испаряемости».

5.2.4. Водостойкость

Водостойкость применительно к смазкам обозначает несколько свойств: растворимость в воде; способность поглощать влагу из окружающей атмосферы (гигроскопичность); проникаемость смазочного

слоя для паров влаги; его устойчивость к действию капельной и струйной воды, т.е. смываемость водой со смазываемых поверхностей.

Смазки, применяемые в ступицах колес автомобилей, шарнирах рулевого управления и карданных шарнирах, из-за недостаточной герметичности этих узлов подвергаются непосредственному воздействию воды в дождливую погоду. Таким образом, высокой водостойкостью должны обладать не только смазки, предназначенные для постоянной работы в воде, но и универсального и специального назначения.

Особую опасность для смазок, которые могут находиться в непосредственном контакте с водой, представляет растворимость в воде. Установлена ничтожная растворимость в воде жидких и твердых углеводородов и более значительная – мыл, используемых в качестве загустителей. При обычных температурах растворимость мыл в воде не превышает десятых долей процента. С повышением температуры она возрастает, причем особенно сильно у мыл щелочных металлов, которые наиболее растворимы в воде.

Прямой контакт мыльных смазок с водой приводит к их эмульгированию, изменению различных свойств и характера микроструктуры, образуемой загустителем.

При попадании воды в мыльные смазки в результате их эмульгирования изменяются не только реологические, но и другие свойства. Так, испаряемость при 150°C с увеличением концентрации воды для смазок различного состава изменяется по-разному. Добавки 1–5% воды в некоторые смазки снижают испаряемость, и лишь большие количества воды ее повышают. Смазочные свойства одних смазок ухудшаются уже при малых концентрациях воды, а других – при концентрации 15–20%.

Вследствие гигроскопичности смазки способны поглощать влагу из атмосферы. Поглощение ими влаги в результате соприкосновения с парами воды обуславливает в структуре и свойствах смазок качественные изменения, принципиально такие же, как и при попадании в них капельной влаги, однако с меньшей интенсивностью. В силу гидрофобности почти не изменяют своих свойств углеводородные смазки, заметно разупрочняются литиевые смазки, упрочняются литиево-углеродные и, особенно, алюминиевые и комплексно-кальциевые. Наблюдаются также изменения вязкостных свойств, химической стабильности и противоизносных свойств.

Изменение влажности атмосферы может приводить к соответствующим изменениям содержания влаги в смазках и сопровождаться

испарением их дисперсионной среды, окислением, уплотнением и другими нежелательными явлениями.

Проницаемостью смазочного слоя для паров влаги во многом определяется способность смазок предохранять поверхность металлов от коррозии. Исследования влагонепроницаемости ряда защитных и антифрикционных смазок свидетельствуют о значительном сопротивлении диффузии литиево-углеродных смазок и, особенно, солидолов и углеводородной смазки ГОИ-54п.

Водостойкость смазки оценивается тремя основными показателями.

1. Стойкость смазки к вымыванию водной струей – способность смазки сохраняться в подшипнике под воздействием водной струи (ASTM D 1264, IP 215); оценивается количеством вымываемой смазки (в процентах) (рис. 5.11);

2. Способность коррозионной защиты – подавление ржавления металла в присутствии воды; работающий подшипник смазывается смесью смазки и воды, а затем определяется коррозионное поражение внешнего кольца конусного подшипника качения.

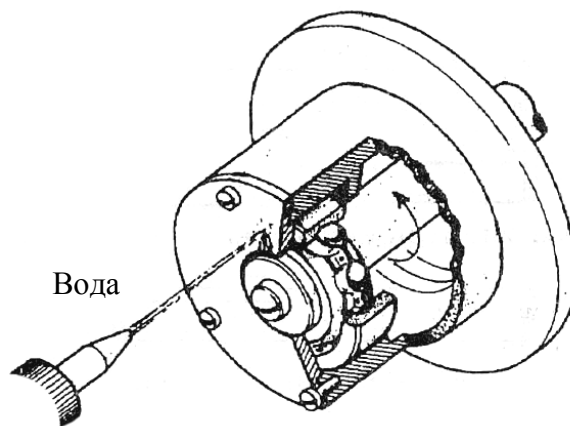


Рис. 5.11. Определение стойкости смазки к вымыванию

Антикоррозионные свойства пластичных смазок (защита металлических поверхностей от коррозии) определяются методом SKF Emcor, регламентированным стандартом ISO 11007. При данном методе испытываемая смазка смешивается с дистиллированной водой и помещается в подшипниковый узел. Подшипник вращается в соответствии с циклом, чередующим остановки и вращения с частотой 80 мин⁻¹. По окончании цикла испытываемая степень коррозии оценивается визуально в баллах от нуля (при полном отсутствии коррозии) до пяти (очень

сильная коррозия, коррозией повреждено более 10% поверхности) (рис. 5.12). Коррозионные повреждения определяются по ASTM D 1743 при температуре 52°C и влажности 100%, «соответствием» или «несоответствием» требованиям стандарту.

Метод испытания в условиях повышенной влажности предполагает использование соленой воды вместо дистиллированной. Дополнительное испытание – это тест SKF на вымывание смазки дистиллированной водой в течение цикла вращения подшипника. Процедура в этом случае не отличается от стандартной, условия испытания более тяжелые, что предъявляет более высокие требования к антикоррозионным свойствам пластичной смазки.

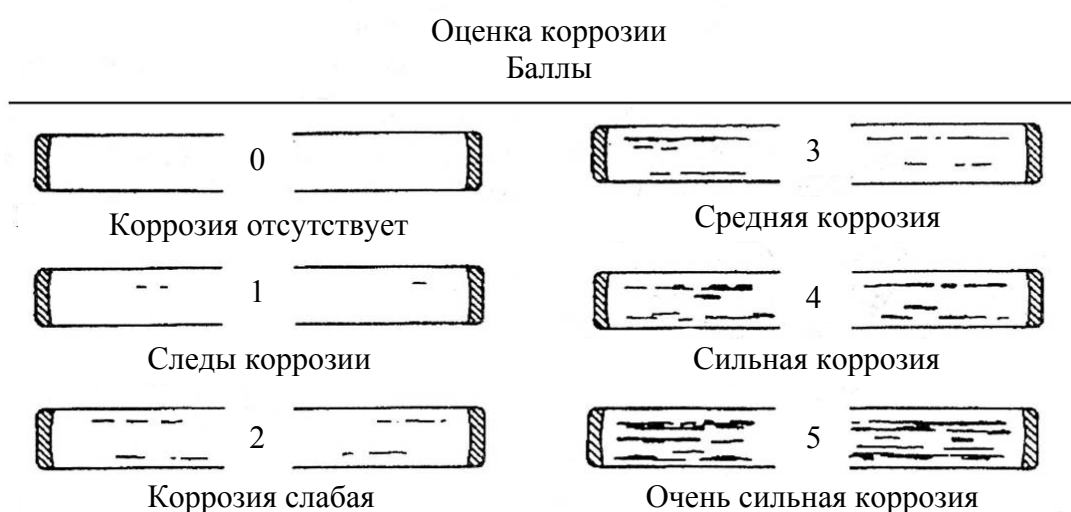


Рис. 5.12. Степени повреждения коррозией подшипника при определении защитных свойств смазок Emcor SKF

3. Характеристика водопоглощения смазки – поведение смазки в присутствии воды. Определяется консистенция смазки вследствие перемешивания с 20% воды, аналогично определению механической стабильности.

Растворимость смазки в воде зависит в основном от природы загустителя. Наилучшей водостойкостью обладают смазки с углеводородным загустителем, водостойкость кальциевых смазок удовлетворительна, и только смазки на натриевых и калиевых мылах хорошо растворимы в воде.

Согласно стандарту DIN 51807 часть 1 водостойкость пластичных смазок измеряется следующим образом. Исследуемая смазка наносится на стеклянную пластину, помещается в пробирку, наполненную

дистиллированной водой. Пробирка помещается в водяную баню с заданной температурой на три часа (рис. 5.13). Изменение вида смазки оценивается визуально по шкале от 0 (изменений нет) до 3 (сильные изменения) при заданной температуре.

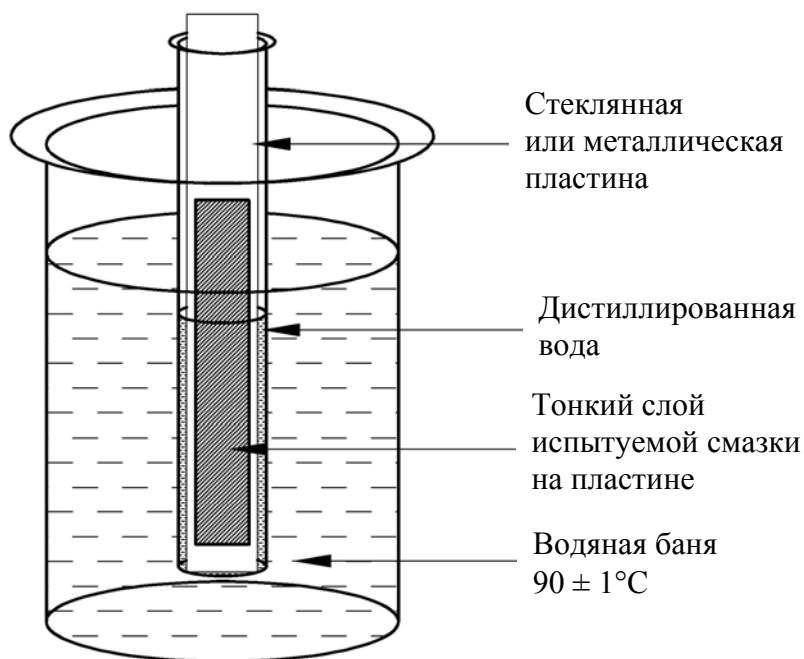


Рис. 5.13. Определение водостойкости пластичной смазки по DIN 51 807

Растворимость смазок определяют только качественно по изменению внешнего вида комка смазки в холодной (при 20°C в течение 24 ч) и кипящей (в течение 1 ч) воде. Если температура плавления смазки ниже 100°C, испытание в кипящей воде не проводится.

Улучшение водостойкости смазки и подавление коррозии достигается путем применения водостойких компонентов, введением в смазку ингибиторов коррозии и ржавления.

5.3. Стабильность смазок

5.3.1. Механическая стабильность и тиксотропные свойства

Механическая стабильность – это способность смазки сохранять консистенцию и механические свойства при долговременном воздействии деформации сдвига, характеризующая тиксотропные свойства

смазок, т.е. способность смазок практически мгновенно восстанавливать свою структуру (каркас) после выхода из зоны непосредственного контакта трущихся деталей. Благодаря этому свойству смазка легко удерживается в негерметизированных узлах трения.

Тиксотропией называют способность дисперсных систем к самопроизвольному восстановлению механически разрушенных структурных связей. Тиксотропные свойства пластичных смазок выражаются в том, что в результате восстановления структурных связей между частицами дисперсной фазы в процессе механического воздействия и, особенно, после его прекращения их предел прочности или вязкость восстанавливаются до определенного уровня (рис. 5.14).

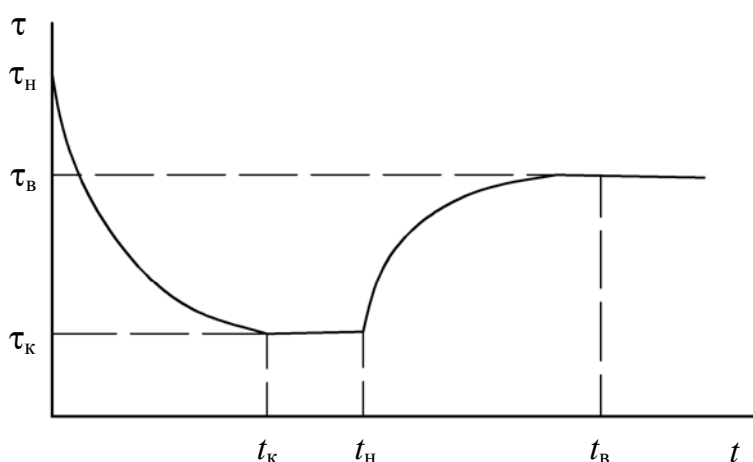


Рис. 5.14. Принципиальная кривая кинетики тиксотропного разрушения и восстановления пластичных смазок: τ_n – до механического воздействия; τ_k – по достижении равновесного значения; τ_v – после восстановления; t_n , t_k , t_v , – соответствующие отрезки времени

Смазка начинает течь под действием силы растяжения и сдвига, которая обрывает структурные связи. Когда сила перестает действовать, коллоидные структурные связи восстанавливаются. Это основной признак смазки. Тиксотропия проявляется в момент смазывания. В движении смазка разжижается и смазывает поверхности, после прекращения движения – густеет и остается в зонах трения. Тиксотропия проявляется в коллоидных системах. Механическая стабильность смазки связана со способностью сохранять возможность восстановления структурных связей.

Полноценная смазка не должна изменять свои свойства ни в процессе работы (деформация), ни при последующем отдыхе. Если смазка

при отдыхе сильно затвердевает, то она перестает поступать к рабочим поверхностям, и работа узла трения затрудняется.

Смазки с низкой механической стабильностью быстро разрушаются, разжижаются и вытекают из узлов трения. Это опасно особенно в тех узлах, где в процесс вовлекается весь запас смазки (подшипники скольжения, шарниры, плоские опоры и т.д.). Механически нестабильные смазки достаточно хорошо работают только в надежно герметизированных узлах трения, чему способствует применение специальных уплотнительных устройств или воздействие капиллярных сил.

Механическую стабильность смазки определяют на тиксометре, измеряя ее прочность до и после разрушения смазки (рис. 5.15). В соответствии с ГОСТ 19295–73 разрушения осуществляются при 20°C и градиенте скорости сдвига $(6000 \pm 200) \text{ с}^{-1}$ в течение 100 с или иного времени. Время тиксотропного восстановления определяется через 3 мин, 30 мин, 30 сут и т.д. Его устанавливают в технических требованиях на смазку, а разрушенную смазку выдерживают это время в специальной трубке.

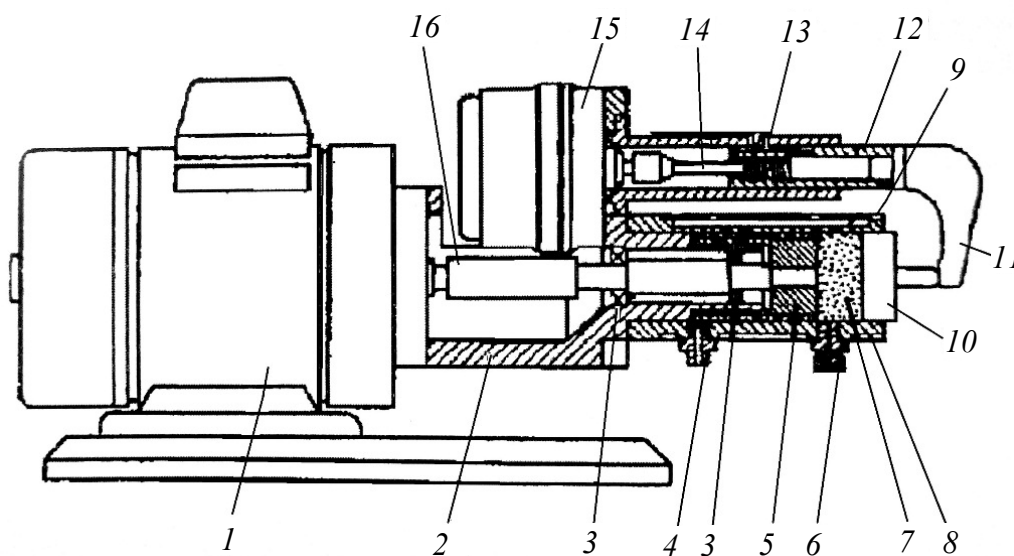


Рис. 5.15. Схема тиксометра:

- 1 – электродвигатель; 2 – корпус; 3 – подшипник; 4 – капилляр для выхода разрушенной смазки; 5 – ротор; 6 – капилляр для выхода неразрушенной смазки; 7 – смазка; 8 – статор; 9 – термостатирующая рубашка; 10 – поршень; 11 – кронштейн; 12 – ходовая гайка; 13 – защелка; 14 – винт; 15 – синхронный электродвигатель; 16 – муфта

Критериями служат:

– индекс разрушения:

$$K_p = \frac{\sigma_{и} - \sigma_p}{\sigma_{и}} \cdot 100;$$

– индекс восстановления:

$$K_v = \frac{\sigma_v - \sigma_p}{\sigma_v} \cdot 100,$$

где $\sigma_{и}$, σ_p , σ_v – предел прочности на разрыв исходной (неразрушенной), разрушенной и после тиксотропного восстановления смазки, Па.

Индексы K_p и K_v могут выражаться положительными и отрицательными числами в зависимости от характера тиксотропных превращений смазки. Время восстановления указывается у индекса в скобках. Например $K_v(30 \text{ мин}) = 50\%$, $K_v(3 \text{ сут}) = 70\%$.

В табл. 5.2 приведены данные о механической стабильности некоторых смазок, полученные вышеописанным методом, а на рис. 5.16 – изменение структуры некоторых смазок после деформирования.

Таблица 5.2

Механическая стабильность смазок

Показатели	Карданная АМ	Литол-24	№ 158	Лита
Предел прочности, Па:				
до разрушения	862	1131	466	1496
после разрушения	563	933	205	227
через 18 с выдержки после восстановления	600	1384	228	198
0,5 ч	685	1400	229	227
24 ч	888	1418	223	244
72 ч	923	1437	223	250
Индекс разрушения K_p	35	17,5	56	-84,8
Индекс восстановления K_v :				
через 18 с выдержки	6,6	48,3	11,2	-12,8
0,5 ч	21,7	50,1	11,7	0
24 ч	57,7	52	8,8	7,5
72 ч	64	54	8,8	10,1

Как показано в табл. 5.2, смазки различного состава заметно различаются по своим показателям.

Механическую стабильность смазок определяют и на машине SKF V2F. Испытательная машина состоит из железнодорожной буксы, подверженной ударной нагрузке от падающей массы с частотой 1 Гц, создающей ускорение 12–15g. Испытания пластичных смазок проводятся на двух частотах вращения – 500 и 1000 мин⁻¹.

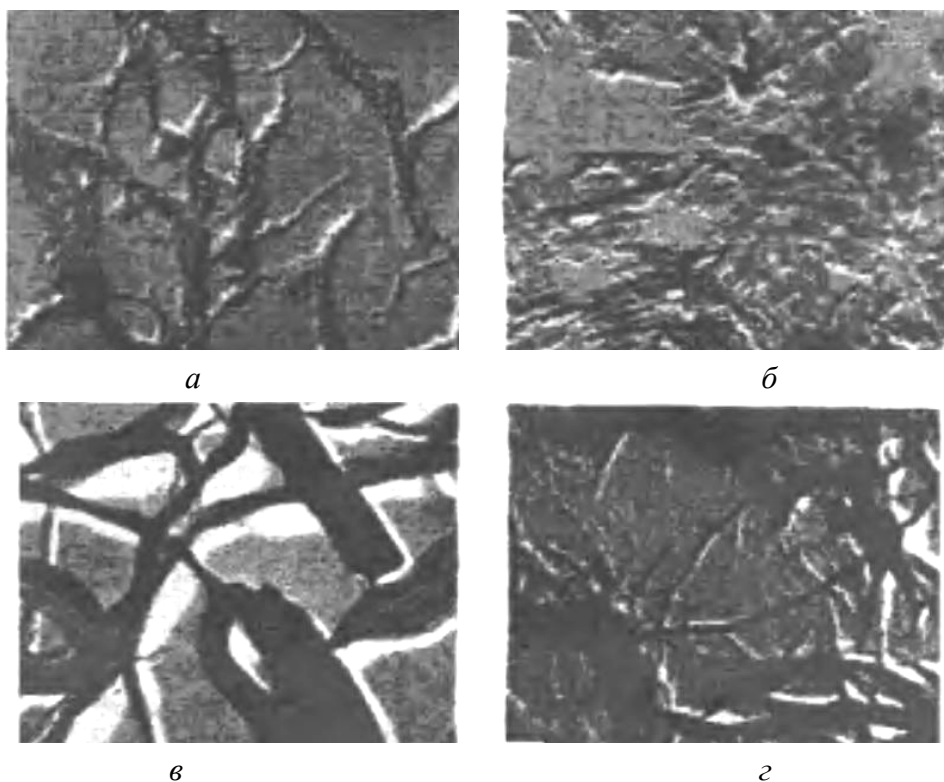


Рис. 5.16. Изменение структуры (увеличение 15 000 раз) солидола УС-2 (*а, б*) и консталина (*в, г*) после деформирования (скорость сдвига 3000 с^{-1} , температура 50°C , длительность деформации 1 ч):
а, в – исходные смазки; *б, г* – разрушенные

Пластичная масса вытекает из буксы через лабиринтные уплотнения и собирается в специальном лотке. Если после 72 ч испытаний при 500 мин^{-1} вытекло менее 50 г смазки, проводятся следующие 72-часовые испытания при 1000 мин^{-1} . Если за время двойного испытания (72 ч при 500 мин^{-1} и 72 ч при 1000 мин^{-1}) вытекло не более 150 г пластичной смазки – выставляется оценка «М». Если смазка выдержала только первую часть испытаний (72 ч при 500 мин^{-1}), но не выдержала вторую часть – выставляется оценка «m». Если утечка составила более 50 г после 72 ч при 500 мин^{-1} – выставляется оценка «неудовлетворительно».

Вследствие неблагоприятного влияния изменения механических свойств пластичных смазок на функционирование узлов трения (затруднен их пуск, ухудшены рабочие характеристики, поступление смазочного материала к контактным поверхностям и увеличено его вытекание) стремятся приготавливать механически стабильные смазки. Для этого, например, уменьшают (до определенных пределов) размеры частиц загустителей и увеличивают их концентрацию, изменяют химический состав масел, вводят соответствующие добавки. Конси-

стенция смазки для подшипников качения не должна значительно меняться в процессе работы.

Количественно механическая стабильность выражается изменением пенетрации после механического утомления, интенсивного перемешивания, которое может осуществляться двумя способами:

- при многократном продавливании смазки через перфорированную пластину – оценивается *рабочая стабильность* (рис. 5.17);
- при перетирке смазки роликом – оценивается *стабильность качения* (рис. 5.18).

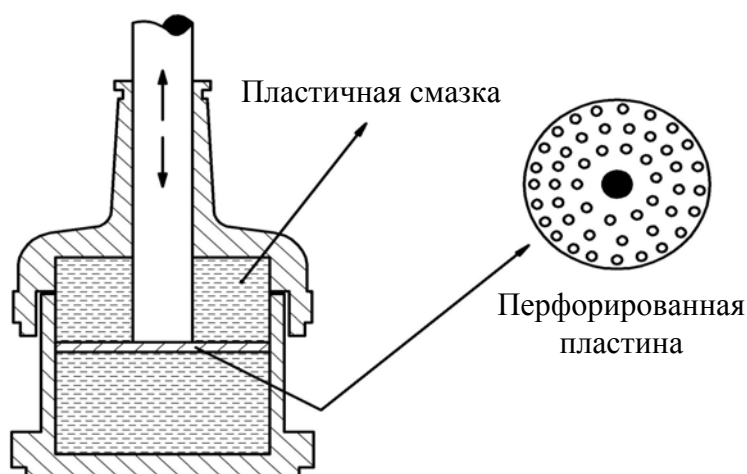


Рис. 5.17. Прибор для утомления смазок путем продавливания через перфорированную пластину

Рабочая стабильность определяется для неработавшей смазки после 60 (W 60), 10 000 (W 10 000) и 100 000 (W 100 000) циклов продавливания. Стандартное число пенетрации определяется после 60 циклов.

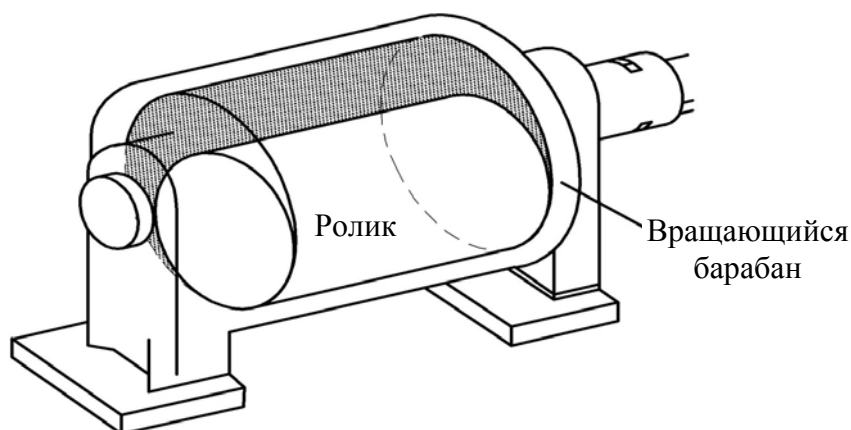


Рис. 5.18. Прибор для утомления смазок роликом

При оценке механической стабильности смазки определяется разница пенетрации после 60 и 100 000 циклов. Она выражается через абсолютную величину ΔP_w или в процентах (табл. 5.3). Испытания проводятся по методу DIN ISO 2137.

Таблица 5.3

Оценка механической стабильности смазки

$\Delta P_w \cdot 0,1$ мм	Характеристика механической стабильности	Отличительный признак смазки
<30	Очень хорошая	Li- и Ca-комплексные смазки
30–60	Хорошая	Li- и Ca-смазки
61–100	Удовлетворительная	Na- и Na-комплексные смазки
>100	Неудовлетворительная	Смеси несовместимых масел

Стабильность качения определяется в машине стабильности качения Shell (Shell Roller) по методу ASTM D 1831. Этим испытанием имитируются условия подшипников качения. Смазка перетирается в пустотелом цилиндре диаметром 100 мм, роликом массой 5 кг и диаметром 60 мм, который соприкасается с цилиндром. Цилиндр вращается 2 ч со скоростью 160 мин⁻¹ при комнатной температуре. После такой работы определяется число пенетрации, которое сравнивается с пенетрацией неработавшей смазки.

В SKF модифицировали эту методику, изменяя условия испытаний в соответствии с условиями эксплуатации и увеличивая время испытаний до 72 и 100 ч при температуре 80 или 100°C. После окончания испытаний пластичная смазка охлаждается до комнатной температуры и оценивается ее пенетрация.

Механическая стабильность смазки связана также с ее *склонностью к взбиванию* с воздухом, которая ухудшает смазочные свойства.

Наряду с механической стабильностью может определяться водостойкость смазки. Для этого смазка перемешивается с 20% дисциллированной или синтетической морской воды и после перемешивания определяется пенетрация. Густота водостойких смазок изменяется незначительно, на несколько единиц пенетрации.

Структурная стабильность – более широкое понятие, чем механическая стабильность. Это способность смазки сохранить начальную консистенцию и текстуру в течение времени и под влиянием разных факторов – температуры, испарения, окисления, загрязнения, перемешивания, а также способность смазки возвращаться в начальное состояние по окончании действия этих факторов.

5.3.2. Коллоидная стабильность, синерезис

Коллоидная стабильность, синерезис – способность смазок удерживать жидкую фазу, не расслаиваться и не вытекать при хранении, транспортировке и работе (под действием температуры, давления и других факторов или при самопроизвольном выделении вследствие структурных изменений, например под действием собственной массы), является показателем агрегативной устойчивости смазок как коллоидных систем. Коллоидная стабильность смазок определяется степенью совершенства их структурного каркаса и вязкостью дисперсионной среды: чем выше вязкость масла, тем труднее ему вытекать из объема смазки. Многие смазки на основе маловязких масел или с малым содержанием загустителей недостаточно коллоидностабильны. Для предотвращения либо понижения выделения масла из таких смазок их расфасовывают в небольшую тару.

Определение коллоидной стабильности необходимо в связи с тем, что пластичные смазки подобно другим коллоидным системам с течением времени способны выделять дисперсионную среду. В зависимости от количества выделившегося жидкого масла смазка может ухудшиться или полностью потерять свои смазочные свойства, т.е. может повыситься предел прочности (вплоть до утраты пластичности) и вязкость смазок, снизиться адгезия к смазываемым поверхностям, их защитные, смазывающие и другие свойства.

Поскольку маслоотделение ускоряется под действием нагрузок (собственная масса, прилагаемые давления, центробежные силы) и температуры, эти интенсифицирующие факторы положены в основу существующих методов определения коллоидной стабильности смазок. Метод определения коллоидной стабильности на приборе КСА (рис. 5.19) по ГОСТ 7142–74 основан на отжати из смазки масла под нагрузкой.

Заполненную смазкой чашку с поршнем устанавливают дном вверх на стопку пропитанных маслом бумажных фильтров. Давление на смазку осуществляется грузом (обычно 1 кг) через поршень в течение 30 мин при комнатной температуре. Взвешиванием определяют массовую долю масла (в процентах), отпрессованного на фильтре. Хорошей коллоидной стабильностью обладает смазка с показателями от 0 до 5%, удовлетворительной – от 5 до 15%, низкой – более 15%.

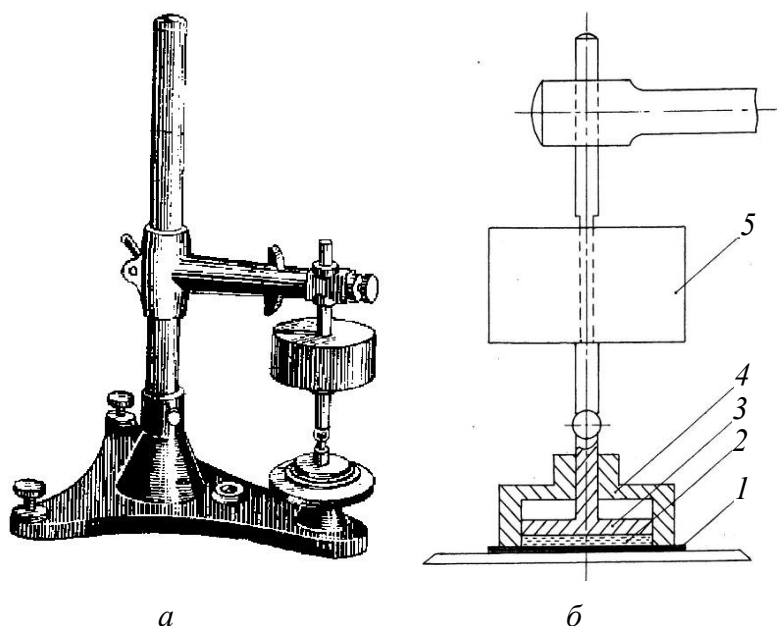


Рис. 5.19. Прибор КСА:
a – общий вид; *б* – схема:
 1 – бумажные фильтры; 2 – слой смазки;
 3 – поршень со штоком; 4 – чашка; 5 – груз

На рис. 5.20 показана схема определения коллоидной стабильности смазки (маслоотделения) по стандарту IP 121. При испытаниях определенное количество смазки помещается в специальный сосуд, имеющий дно конической формы с отверстиями, под грузом массой 100 г. Сосуд помещается в термостат с температурой 40°C на одну неделю (168 ч).

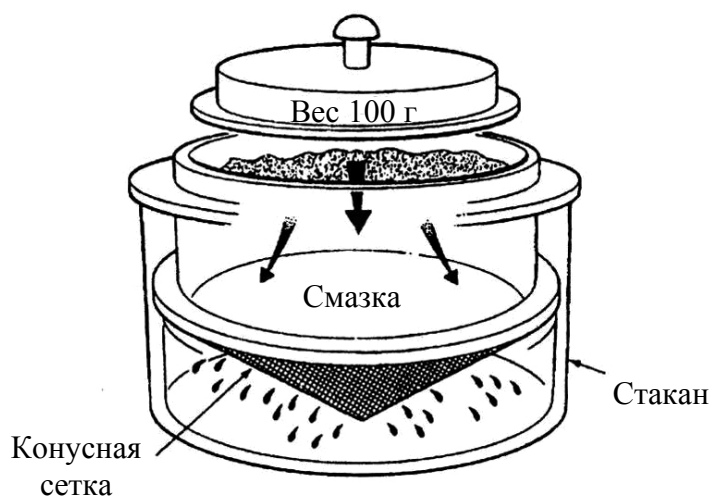


Рис. 5.20. Схема определения истечения масла по IP 121

После этого количество отделенного масла относится в процентах к первоначальной массе смазки. Допускаемая норма выделения масла по стандарту ASTM D 1742 – от 6 до 10%. Испытание на маслоотделение регламентировано стандартом DIN 51 817.

Появление небольшого количества выделившегося масла при его хранении не является недостатком. Незначительное выделение масла желательно, особенно для смазывания подшипников качения. Если масло легко вытекает в процессе работы, смазка может потерять большую его часть и повредить механизмы. Слишком большая утечка масла имеет место при неправильном соотношении загустителя и масла, плохой их совместимости и нестабильности коллоидной структуры смазки, а также зависит от вязкости дисперсионной среды (рис. 5.21).

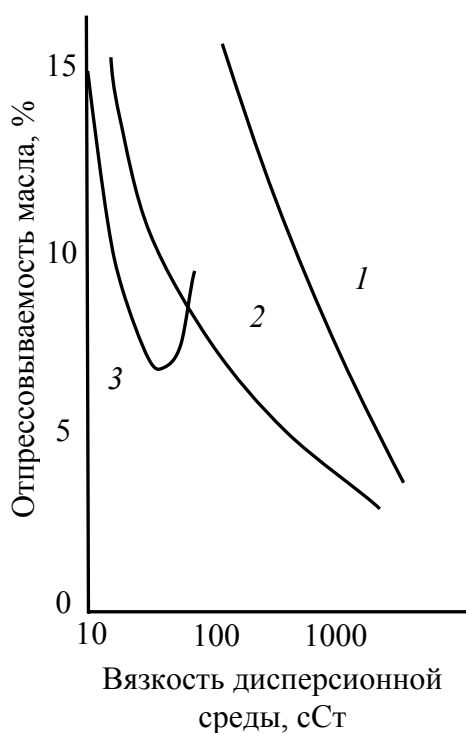


Рис. 5.21. Зависимость отпрессовываемости масла (коллоидной стабильности смазки) от вязкости дисперсионной среды смазок: 1 – литиевые; 2 – силикагелевые; 3 – натриевые

Высокой коллоидной стабильностью при хранении характеризуются углеводородные смазки, которые обычно применяют для консервации изделий.

Из приведенного ниже примера видно, что автотракторные смазки могут существенно различаться по коллоидной стабильности (проценту выделившегося масла):

Литол	7,8
1-13	12,2
ШРБ-4	3,3
№ 158	12,0

5.3.3. Адгезия и склонность к утечке

Хорошая адгезия (липкость) способствует прилипанию смазки к контактирующим поверхностям. Липкость увеличивается присадками – полимерами большой молекулярной массы – либо базовым маслом повышенной вязкости. Липкость влияет на долговременное сохранение смазки в зонах смазывания. *Склонность к утечке* смазки является важной эксплуатационной характеристикой при работе в открытых подшипниках. Определяется по стандартному методу ASTM D 1263 (рис. 5.22) или ASTM D 4290 (при повышенной температуре).

Подшипник работает 20 ч при температуре 160°C, скорости 100 мин⁻¹, нагрузке 111 Н, после чего определяются потери смазки в граммах. Допускаемое вытекание – меньше 24 г для смазки NLGI GB и 10 г для смазки NLGI GC.

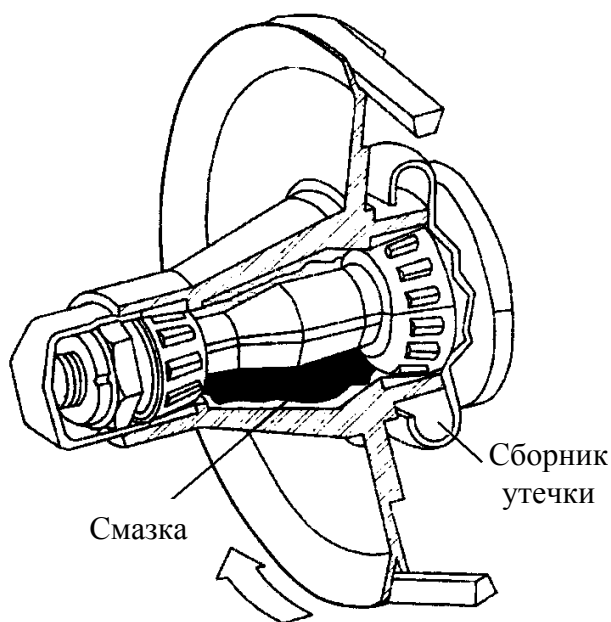


Рис. 5.22. Схема определения утечки масла по ASTM D 1263

5.3.4. Термоупрочнение, или термическая стабильность

Термоупрочнение, или термическая стабильность характеризует устойчивость смазок к температурному воздействию, т.е. изменение свойств смазок при нагревании и последующем охлаждении. Термоупрочнение затрудняет поступление к узлам трения смазок, ухудшает их адгезионные свойства.

Большинство смазок после нагрева до температуры на 50–60°C ниже температуры их плавления и последующего охлаждения не меняют свои свойства. Установлено, что при повышенных температурах некоторые виды смазок способны сильно упрочняться уже в процессе кратковременной выдержки. В результате предел прочности повышается в 10–100 раз.

В результате термоупрочнения при эксплуатации затрудняется поступление смазок в зону трения и взаимное перемещение подвижных деталей узлов. В особо тяжелых случаях наблюдается потеря смазками части дисперсионной среды, растрескивание и образование комков, разрушение и отставание смазочного слоя, которые приводят к утрате ряда функций, хотя внешне это может выглядеть как улучшение их коллоидной стабильности.

В табл. 5.4 приведены данные об изменении прочности и коллоидной стабильности некоторых смазок в результате термообработки при 120°C в течение 1 ч.

Таблица 5.4

Термическая стабильность смазок

Смазки	Предел прочности, гПа		Коллоидная стабильность, %	
	исходный	конечный	исходная	конечная
Натриевые: консталин: жировой синтетический	15,7	32,0	13,6	11,8
	4,7	50,0	2,9	1,8
Кальциево-натриевые 1-13: жировая синтетическая	1,8	22,0	17,6	14,1
	4,8	32,0	3,5	3,6
Гидратированные кальциевые: солидол: жировой синтетический	9,0	10,3	10,3	12,1
	2,9	5,5	–	–
Литиевые: ЦИАТИМ-201 ЦИАТИМ-203	8,6	11,6	24,3	32,5
	9,0	5,9	–	–

ГОСТ 7143–73 предусматривает определение термической стабильности на прочномере СК (рис. 5.23).

Испытуемую смазку помещают в кольцевой зазор между двумя соосными ребристыми цилиндрами 12 и 13, исключая ее проскальзывание вдоль стенок, и после часовой выдержки узла со смазкой при 120°С определяют термическую стабильность путем измерения ее пределов прочности до и после выдержки при повышенной температуре. Внутренний цилиндр 12 приводится во вращение электродвигателем, и по отклонению стрелки пружинного динамометра измеряется угловая деформация.

Предел прочности $\tau_{п}$, Па, рассчитывают по формуле

$$\tau_{п} = k \cdot \gamma = \frac{C \cdot \gamma}{2\pi R_{в}^2 \left(h + \frac{R_{в}}{3} \right)},$$

где k – постоянная прочномера; γ – максимальный угол поворота контрольной стрелки, град; C – постоянная пружины, Н·м/град; $R_{в}$ – радиус (по выступам рифления) внутреннего цилиндра, м; h – высота внутреннего цилиндра, м.

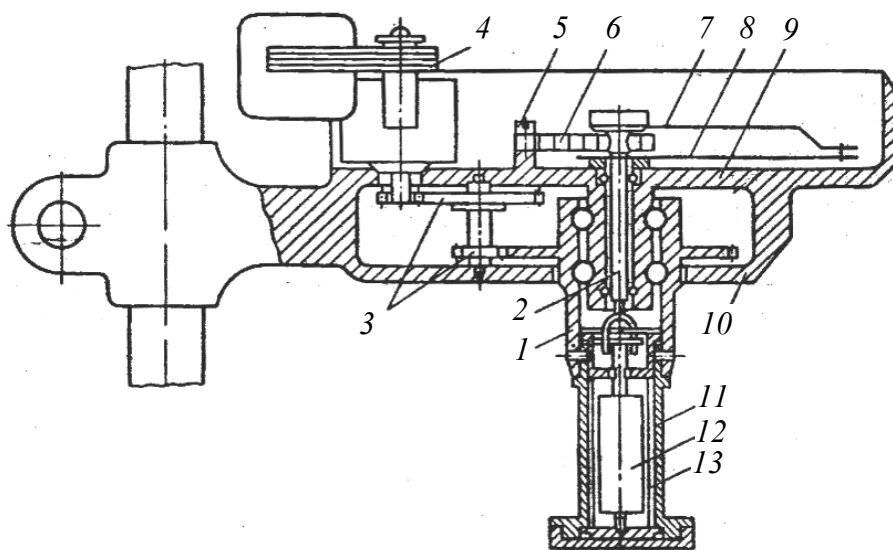


Рис. 5.23. Схема прочномера СК

для оценки предела прочности и термоупрочнения пластичных смазок:

- 1 – приводная втулка; 2 – ось; 3 – понижающий редуктор; 4 – электродвигатель;
 5 – цилиндрическая колонка; 6 – пружина; 7 – контрольная стрелка;
 8 – стрелка-фиксатор; 9 – шкала; 10 – корпус; 11 – внешний цилиндр;
 12 – внутренний цилиндр; 13 – смазка

Термоупрочняемость смазок зависит в наибольшей степени от природы загустителя, а также от природы и свойств дисперсионной среды. Причиной термоупрочнения следует считать процессы, связанные с фазовыми превращениями при изменении структуры для мыльных смазок. Наиболее термоупрочняющимися являются натриевые смазки, литиевые же смазки при термообработке разупрочняются.

Возрастающее ужесточение условий работы ступиц колес, карданных передач и шарниров рулевого управления современных машин и повышение верхнего температурного предела их эксплуатации обуславливают необходимость повышения внимания к термической стабильности смазок, предназначенных для работы в этих узлах.

5.3.5. Химическая стабильность

Химическая стабильность – показатель устойчивости смазок к химическому воздействию. Под этой характеристикой имеют в виду стабильность смазок при их окислении кислородом воздуха, который в большинстве случаев является рабочей средой (в широком смысле – отсутствие изменения свойств смазок при воздействии на них кислот, щелочей и др.). Окисление приводит к образованию и накоплению кислородсодержащих соединений в смазках, снижению их прочности, коллоидной стабильности и ухудшению иных показателей. Повышение химической стабильности позволяет увеличить сроки хранения и эксплуатации машин и обеспечить их нормальную работу во все более ужесточающихся условиях. Считают, что показатель химической стабильности важен для всех смазок, которые применяются при температуре 100°С и выше. Стойкость к окислению особенно важна для таких смазок, которые заправляются в узлы трения 1–2 раза в течение 10–15 лет, работают при высоких температурах, в тонких слоях и в контакте с цветными металлами. Это так называемые «вечные» смазки, которые закладывают на заводе и не меняют до капитального ремонта или до полного износа машины.

В результате окисления структура и свойства смазок претерпевают различные изменения. Возможны размягчение и затвердевание смазок с образованием корок, растрескиванием и отставанием слоя от поверхности, отмечены случаи снижения механической и коллоидной стабильности, повышения или понижения температуры каплепадения, потери защитной способности и приобретения коррозионной агрессивности. Основным компонентом смазок, который подвергается окислению, является их дисперсионная среда.

Химическая стабильность смазок во многом определяется природой загустителя. Углеводородные смазки характеризуются исключительно высокой химической стабильностью. Мыльные смазки менее стабильны, поскольку мыла на процесс окисления дисперсионной среды оказывают катализирующее воздействие. Алюминиевые смазки по этому показателю близки к чисто углеводородным.

Окисляемость смазок снижают некоторые порошкообразные наполнители: графит, MoS₂ и, особенно, слюда. Однако еще больший положительный эффект дает введение в состав смазок антиокислителей из числа ароматических аминов и некоторых соединений, содержащих серу и фосфор.

Оценку химической стабильности смазки (ГОСТ 5734–76) определяют по изменению (приросту) кислотности или щелочности смазок после выдержки и оценивают кислотным числом. Для этого испытуемую смазку наносят слоем 1 мм на пластинку из электролитической меди и выдерживают 10 ч при повышенной температуре (120°C). Стабильность смазок против окисления (кислотное число) определяют как разность массовых долей свободных кислот или щелочей до и после окисления.

Ниже приведены данные по окислению некоторых смазок, прирост кислотности (1 мг КОН на 1 г):

ЯНЗ-2	1,1
1-13	0,5–2,5
Униол-1	0,2–0,8
Литол-24	0,5–1,5
Карданная АМ	1,4

Высокая химическая стабильность смазок может быть обеспечена в результате тщательного подбора дисперсионной среды, загустителей и присадок, определения их оптимальной концентрации и применения эффективной технологии.

5.3.6. Пенетрация

Важной характеристикой механических свойств пластичной смазки является консистенция смазки. *Консистенция смазки* – условная мера механической прочности, твердости. Выражается в номерах или степенях консистенции по системе NLGI (NLGI consistency numbers), которые устанавливаются по пенетрации.

В 1991 г. американская организация NLGI (Национальный Институт пластичных смазок) ввела единую международную классификацию по уровню пенетрации или консистенции. *Пенетрация* (лат. *penetratio* –

проникать) – мера проникновения конусного тела в смазку, употребляемая для характеристики консистенции (густоты) смазок.

Пенетрация характеризует консистенцию смазки, т.е. способность нести нагрузку и сопротивляться выдавливанию ее из узла трения, а также показатель густоты (мягкости) смазки.

По ГОСТ 5346–76 пенетрация смазок определяется в приборе, называемом *пенетрометром*. На рис. 5.24 приведена схема определения пенетрации, а на рис. 5.25 – пенетрометр.

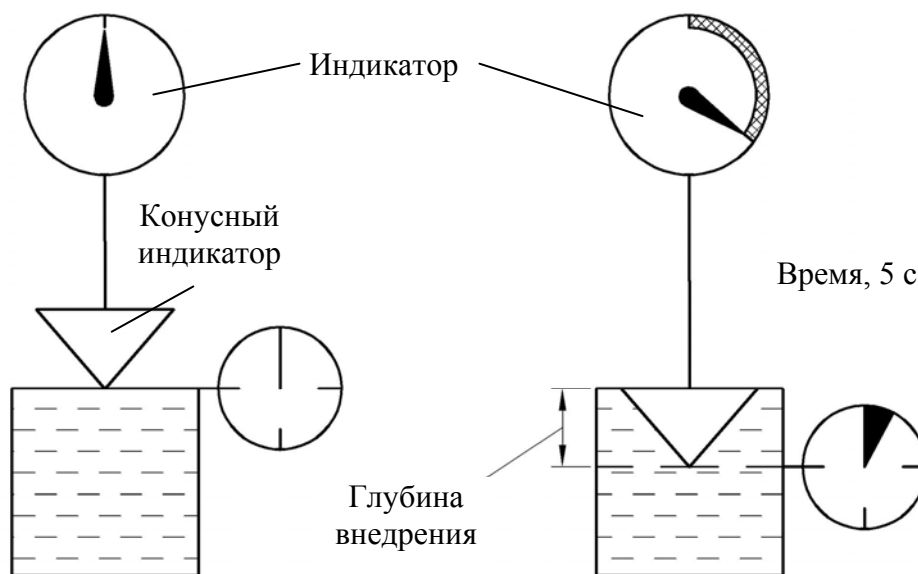


Рис. 5.24. Схема определения пенетрации

Металлический конус (150 г) стандартного размера и формы погружают (под собственным весом) в смазку при определенной температуре в течение 5 с. По глубине погружения конуса в смазку оценивается ее консистенция. Глубина погружения конуса, выраженная в миллиметрах и умноженная на 10, называется *числом пенетрации* смазки. Например, если конус погрузился в смазку на 26 мм, то это значит, что смазка имеет пенетрацию, равную 260. Чем мягче смазка, тем глубже в нее войдет конус и тем выше ее пенетрация. Более твердые смазки характеризуются меньшим числом пенетрации. Общий вид и принципиальная схема пенетрометра приведены на рис. 5.25.

Основная деталь прибора – составной конус 2, жестко связанный со штоком 5, который удерживается пружинным стопором 3 в направляющей штатива 4.

Стакан 1 с испытуемой смазкой предварительно выдерживается при 25°C не менее часа. С помощью стопора 3 освобождается конус 2, который в течение 5 с погружается в смазку.

Число делений, на которое повернется стрелка 8 рейкой 9 через шестеренку 7, будет представлять собой выраженную в десятых долях миллиметра глубину погружения стандартного конуса, или пенетрацию смазки. Чем глубже погрузился конус в пластичную смазку, тем меньше класс NLGI, мягче смазка, и тем легче она будет выдавливаться из зоны трения.

Смазки с высоким номером NLGI будут создавать дополнительное сопротивление и плохо возвращаться в зону трения.

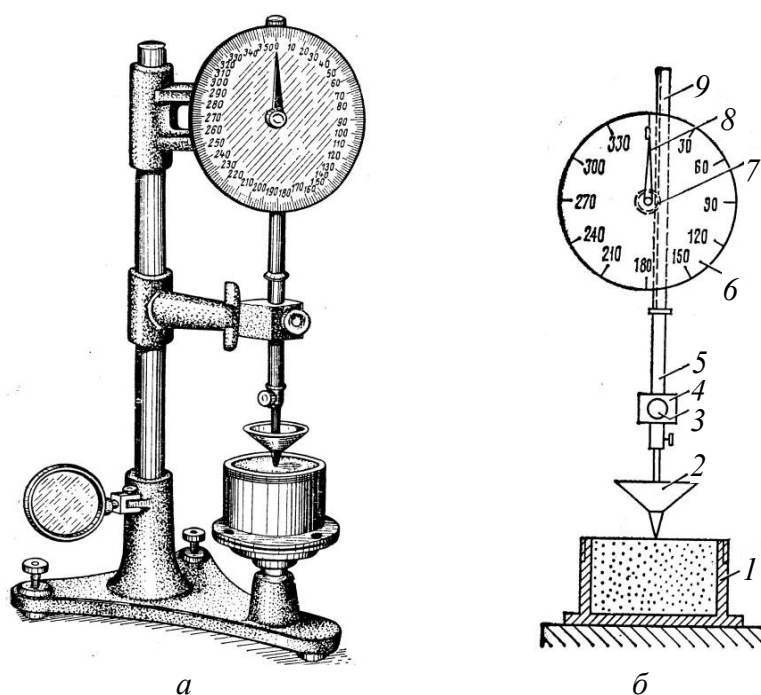


Рис. 5.25. Пенетромтр:
а – общий вид; б – принципиальная схема

Классификация NLGI пластичных смазок по консистенции приведена в табл. 5.5 (соответствует сортам DIN 51 818).

Пенетрация не отражает реологических свойств смазок в конкретных условиях. Этот показатель в основном определяется при заводском контроле и квалификационной оценке, что позволяет оценивать единообразие выпускаемой продукции. Пенетрация дает возможность судить о пригодности смазки для данного метода подачи ее к узлу трения.

Классификация пластичных смазок по консистенции NLGI

NLGI №	Пенетрация, 0,1 мм	Состояние смазки	Применение смазки
000	445–475	Как вязкое масло	Для централизованного смазывания и для смазывания передач и шестерен
00	400–430	Полужидкая	Для смазывания подшипников скольжения и качения
0	355–385	Очень мягкая	
1	310–340	Очень мягкая	
2	265–295	Мягкая смазка	Для создания герметичности
3	220–250	Густоватая	
4	175–205	Густая	
5	130–160	Очень густая	
6	85–115	Очень густая, как мыло	

За рубежом показателем пенетрации широко пользуются, так классификация Национального института США основана на делении смазок по числу пенетрации.

5.3.7. Температура каплепадения

Температура каплепадения служит критерием перехода пластичных смазок в текучее состояние при нагревании. Это температура, при которой смазка из пластичного твердого состояния, при ее нагреве в воздушном термостате с заданной скоростью (1° в минуту), переходит в жидкое состояние и происходит падение первой капли смазки из капсюля. Она характеризует температуру плавления загустителя, разрушения структуры смазки и ее вытекания из смазываемого узла (определяет верхний температурный предел работоспособности не для всех смазок).

В зависимости от температуры каплепадения смазки подразделяют:

- на низкоплавкие – Н ($t_{\text{капл}} \leq 60^\circ\text{C}$);
- среднеплавкие – С ($60^\circ\text{C} \leq t_{\text{капл}} \leq 100^\circ\text{C}$);
- тугоплавкие – Т ($t_{\text{капл}} > 100^\circ\text{C}$).

Смазка с низкой температурой каплепадения не будет удерживаться в механизме: может вытекать из подшипников, сползать с поверхности под действием силы тяжести или разбрызгиваться под действием центробежных сил, и поэтому ее придется часто пополнять. Смазка с чрезмерно высокой температурой каплепадения вызовет усиленный нагрев трущихся деталей.

Температура плавления зависит в основном от загустителя. Температура каплепадения не является прямым показателем рабочей температуры, но по ней приблизительно можно устанавливать верхнюю температуру нагрева смазки. При температуре каплепадения смазки до 100°C максимальная рабочая температура на 15–20°C ниже, при температуре каплепадения до 150°C – ниже на 30–40°C и при каплепадении до 200°C – ниже на 60–80°C.

Для определения температуры каплепадения смазок служит специальный прибор (ГОСТ 6793–74), изображенный на рис. 5.26. Основная его деталь – термометр *1* с миниатюрным ртутным шариком. К нижней части термометра прикреплена металлическая гильза *5*, в которой на трении держится стеклянная чашечка *б* с калиброванным донным отверстием (рис. 5.26, *б*).

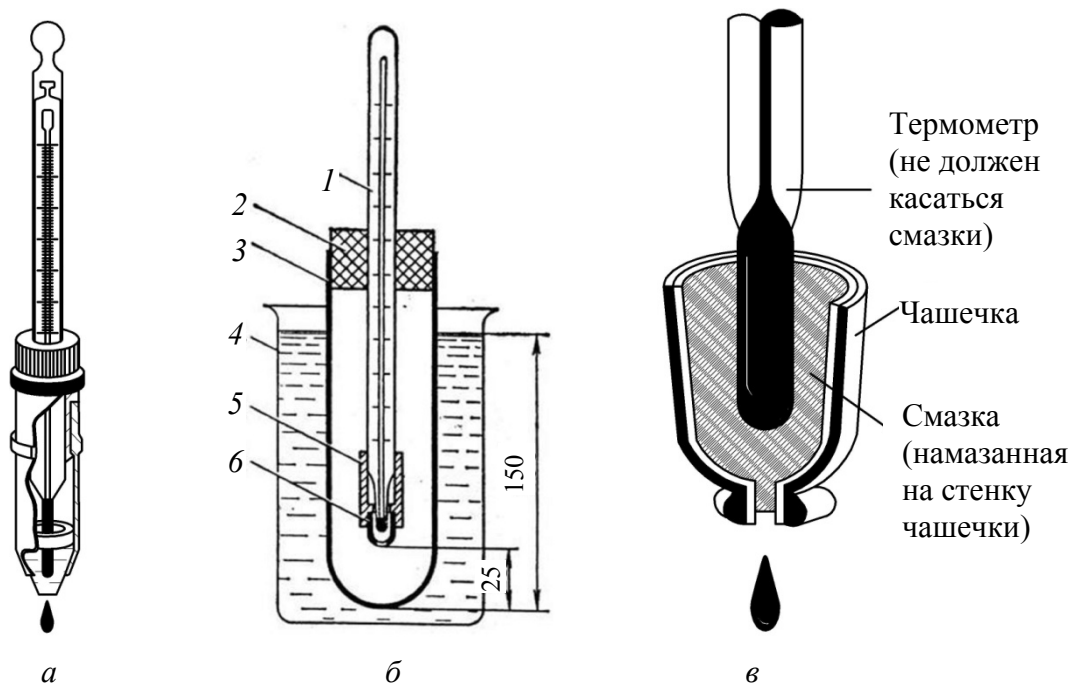


Рис. 5.26. Прибор для определения температуры каплепадения смазок (термометр Убеллоде):
а – общий вид; *б* – схема; *в* – установка термометра в чашечке со смазкой

Нагревание жидкости (вода или глицерин) в стакане *4* осуществляется газовой горелкой (или электроподогрев) в два этапа. Первый этап, скорость нагрева на котором не нормирована, охватывает интервал температур от комнатной до 30°C для низкоплавких, 60°C для среднеплавких, до 110°C для натриевых и до 150°C для литиевых смазок. На втором этапе темп повышения температуры смазки

в приборе должен составлять 1° в минуту. Жидкость в стакане периодически помешивается специальной мешалкой.

Температура, при которой в процессе нагревания падает из чашечки первая капля испытуемой смазки, называется температурой каплепадения. Она условно определяет среднюю температуру плавления смазки и должна превышать рабочую температуру трущихся деталей не меньше чем на $15\text{--}20^\circ\text{C}$. Если смазка не образует капли, а вытягивается из чашечки в виде цилиндра, то за температуру каплепадения принимают ту, при которой выходящий столбик смазки коснется дна пробирки 3. В обоих случаях результат надо округлять до целых чисел.

Кроме температуры каплепадения, есть и другие показатели, характеризующие температурные свойства пластичных смазок.

5.3.8. Интервал рабочей температуры

Интервал рабочей температуры – температура, при которой смазка может выполнять свои функции и обладает свойствами, декларируемыми изготовителем. Рабочие условия в зонах трения могут быть обусловлены и другими факторами, поэтому указанные рабочие температуры должны приниматься только как приблизительные. Свойства смазки ухудшаются при химическом разложении компонентов смазки. Например, температура каплепадения смазок на основе кальциевых комплексных мыл достигает $250\text{--}300^\circ\text{C}$, а химическое разложение начинается уже при температуре 160°C . Минимальная рабочая температура определяется более четко. Она ограничивается не температурой застывания смазки, а показателями консистенции и механических свойств.

5.3.9. Минимальная рабочая температура смазки

При низкой температуре смазки должны работать без значительного изменения консистенции, липкости и механических свойств. При весьма низких температурах используются смазки на основе силиконового, эфирного или полиальфаолефинового базового масла.

Основным показателем *низкотемпературных свойств* смазки является *давление течения*, определяемое по DIN 51 805. Давление течения в 1400 гПа считается предельным, более твердые смазки уже непригодны для смазывания. Температура, при которой достигается давление течения смазки в 1400 гПа, принимается за минимальную рабочую температуру смазки и определяется по низкотемпературному моменту вращения, по методу ASTM D 1478, для смазок, используемых в подшипниках качения.

В заключение приведем эти показатели для масел UNIREX № 2 и UNIREX № 3 (фирмы ESSO/EXXON): давление течения при -20°C составляет для смазки № 2 – 1000 гПа, а для смазки № 3 – 1400 гПа. Это высокотемпературные универсальные пластичные смазки, предназначенные для смазывания подшипников качения различных типов. Они состоят из литиевого комплексного мыла в очищенном минеральном масле. Даже при рабочих температурах выше 150°C , при длительной эксплуатации с высокими нагрузками и при удлиненных периодах смены смазки структура и консистенция сохраняются в течение длительного срока применения.

5.4. Другие показатели смазок

5.4.1. Содержание механических примесей

Содержание механических примесей. Их нельзя удалить из смазки путем отстаивания или фильтрации, как это делается при очистке жидких масел или топлива.

Содержание механических примесей в мыльных смазках определяют по ГОСТ 6479–73 или по ГОСТ 1036–75, в углеводородных смазках – по ГОСТ 6370–83. При анализе смазок ответственного назначения, основанного на определении с помощью микроскопа числа непрозрачных частиц и их размеров, используется ГОСТ 9270–86.

Массовую долю механических примесей вычисляют в процентах. Массовая доля механических примесей до 0,02% включительно принимается за их отсутствие.

5.4.2. Содержание кислот и щелочей

Присутствие водорастворимых кислот в силу их реакционной способности и коррозионной активности в смазках не допускается или строго ограничивается (рис. 5.27).

Свободные же щелочи зачастую являются компонентом, необходимым для стабилизации смазок, приготовленных на мылах щелочных и щелочноземельных металлов, и для нейтрализации кислых продуктов. Кислые продукты органического происхождения могут попасть в смазки в виде присадок и примесей к углеводородному сырью или образовываться в них в результате окисления.

Содержание в смазках свободных органических кислот и щелочей определяется по ГОСТ 6707–76, а кислых продуктов органического

происхождения в углеводородных смазках – по ГОСТ 5985–79. ГОСТ 6307–75 устанавливает качественное присутствие в мыльных смазках водорастворимых кислот и щелочей.

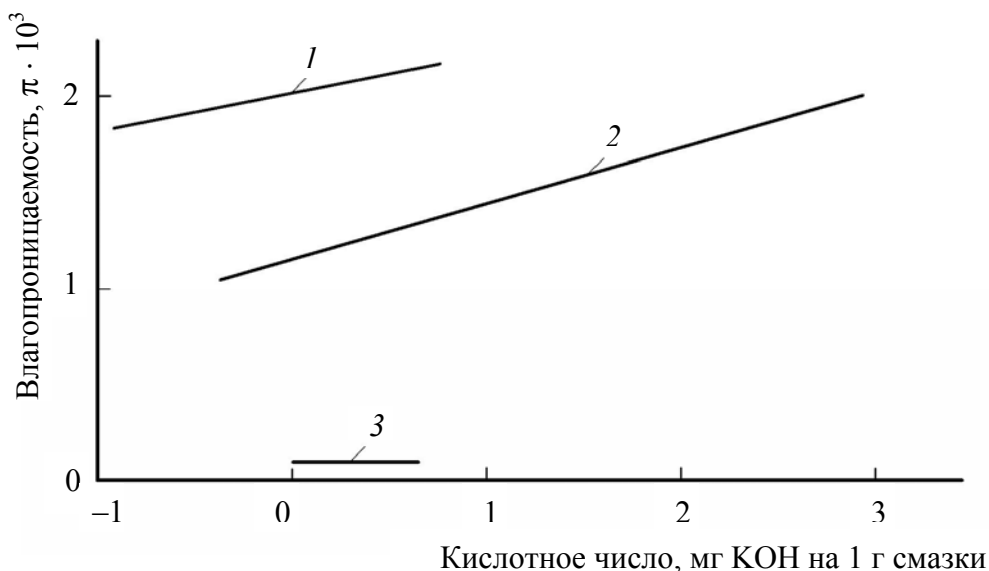


Рис. 5.27. Изменения влагопроницаемости смазок при окислении:
1 – ЦИАТИМ-205; 2 – ЦИАТИМ-201; 3 – ЦИАТИМ-221

Кислотное число выражается в мг КОН/г. Массовая доля свободных органических кислот до 0,02 мг КОН на 1 г смазки или 0,02% оценивается как отсутствие в смазке свободных органических кислот.

5.4.3. Содержание воды

Содержание воды в смазках определяют в связи с тем, что в некоторых из них она необходима как стабилизатор структуры, а в других ее присутствие не допускается. Как стабилизатор вода в определенном количестве должна содержаться в гидратированных кальциевых смазках – солидолах (до 2,5–3,0%), в натриевых смазках типа консталинов (до 0,5%) и в кальциево-натриевых смазках типа 1-13 (до 0,75%). Ее удаление при нагревании приводит к расслоению смазок. Наличие воды определяют по ГОСТ 2477–65 количественно или по ГОСТ 1547–84 качественно.

При массе нефтепродукта ($100 \pm 0,1$) г за массовую долю воды, при количественном определении, принимают объем воды, собравшейся в приемнике-ловушке (см^3). Объем воды в приемнике-ловушке $0,03 \text{ см}^3$ и меньше считается следами.

5.4.4. Противокоррозионные свойства

Противокоррозионные свойства смазок характеризуют их коррозионное воздействие на металлические поверхности деталей узла трения. Если свежие смазки обладают устойчивыми противокоррозионными свойствами, то в процессе их применения или после длительного хранения их свойства ухудшаются. Это связано с изменениями, вызываемыми процессами окисления смазки. Дополнительным фактором, ускоряющим этот процесс, является вода.

Склонность пластичных смазок к окислению, как правило, выше, чем у минеральных масел. Процессы окисления и другие химические превращения ускоряются при контакте смазки с металлом. Признаком окисления смазки является медленный в условиях хранения и более быстрый в период эксплуатации рост кислотности. Продукты окисления, особенно низкомолекулярные органические кислоты, сильно увеличивают коррозионную агрессивность смазок по отношению к металлам и, кроме того, облегчают проникновение вредных соединений, содержащихся в атмосфере воздуха.

Накопление продуктов окисления отрицательно влияет на защитные свойства пластичных смазок. С процессами окисления связано также ухудшение механической и коллоидной стабильности смазок.

Отрицательное влияние окисления нежелательно для любых смазок независимо от их назначения, но особенно жесткие требования предъявляются к консервационным смазкам. Такими же защитными свойствами должны обладать смазки, закладываемые в узлы машин на весь срок их службы. Средством, предотвращающим естественное окисление этих продуктов, является применение *ингибиторов окисления*.

Коррозионность смазки оценивается разными стандартами, суть которых состоит в выдерживании в смазке при определенных условиях металлических пластин или стержней с последующей оценкой повреждения поверхности в баллах.

Противокоррозионные свойства смазок оцениваются в соответствии с ГОСТ 9.080–77 визуально по изменению цвета металлических пластинок, находящихся в контакте со смазками в течение 3 ч при 100°C (или при 70°C, если температура каплепадения их ниже 100°C).

Смазка считается выдержавшей испытание (для стальных, алюминиевых, цинковых пластинок), если на их поверхностях нет заметных глазом пятен или точек. На пластинках, содержащих медь, не должно быть также зелени, коричневых или черных пятен, налетов или пленки.

Подавление коррозии достигается путем введения в смазку ингибиторов коррозии и ржавления.

5.4.5. Защитные (консервационные) свойства

Защитные (консервационные) свойства определяют способность смазки предохранять трущиеся металлические поверхности от коррозионного воздействия внешней среды (вода, растворы солей и др.) и одновременно быть инертной к ним. На рис. 5.28 приведена схема атмосферной коррозии черных металлов.

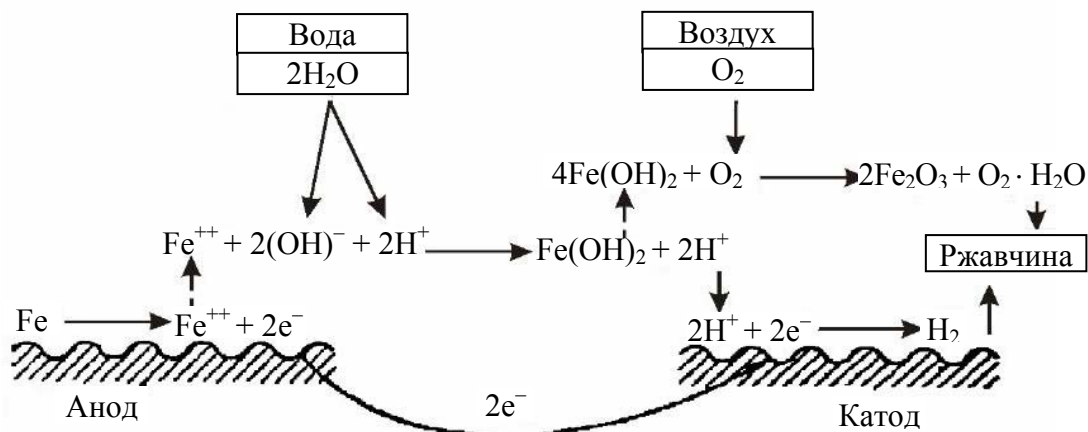


Рис. 5.28. Схема атмосферной коррозии черных металлов

В условиях эксплуатации защитные функции в механизмах выполняют обычные антифрикционные смазки. Значительные расходы, связанные с заменой смазок при переводе от консервации к эксплуатации и обратно, исключаются при применении рабоче-консервационных смазок, обеспечивающих нормальную эксплуатацию и надежное хранение изделий.

Консервационные свойства смазок зависят от следующих факторов: способности удерживаться на поверхности металла не стекая; коллоидной и химической стабильности; водостойкости и воздухопроницаемости. Пленка консервационной смазки толщиной около 0,01 мм может предотвращать коррозию металла в условиях 100-процентной относительной влажности в течение многих месяцев, а иногда и лет.

Для консервации металлоизделий наиболее широко используют углеводородные защитные смазки, ингибированные масла и тонкослойные покрытия. В отличие от защитных смазок применение последних не предусматривает расконсервацию изделий, поскольку защитный эффект обеспечивает их тончайшая поверхностная пленка.

При оценке защитных свойств смазок по ГОСТ 9.054–78 металлические пластинки покрывают слоем смазки, выдерживают в определенных условиях: при повышенной температуре и относительной влажности (над водой в эксикаторе или в камере влажности), при

воздействии солевого тумана и искусственной морской воды, при постоянном погружении в электролит, при воздействии бромистоводородной кислоты и других коррозионно-агрессивных сред.

Критериями оценки обычно служат внешний вид пластинок, площадь коррозии или убыль массы, отнесенная к площади пластинок.

5.4.6. Биологическая разлагаемость

Для экологической безопасности требуется быстрое разложение отработавших смазок в окружающей среде с образованием безвредных соединений. Такие смазки изготавливаются на основе биологически разлагаемых компонентов. Большинство мыл натуральных жирных кислот хорошо разлагаются в природе, они легко осваиваются микроорганизмами.

Масла минеральные и некоторые синтетические, например, силиконовые, в природе разлагаются трудно. Биологическая разлагаемость смазок оценивается по стандартной европейской методике СЕС L-33-A93.

5.4.7. Радиационная стойкость

Радиационная стойкость – показатель стабильности смазок при воздействии излучений высоких энергий (α - и β - частицы, γ -кванты, свободные электроны). Стойкость пластичных смазок к облучению в значительной степени определяется составом дисперсионной среды и может быть представлена следующим рядом: полисилоксаны << сложные эфиры < нефтяные масла < простые эфиры.

В зависимости от типа загустителей смазки могут приобретать «наведенную» радиоактивность; наиболее легко становятся радиоактивными Na-смазки. О радиационной стойкости пластичных смазок судят по изменению их свойств после облучения определенной интенсивности. Суммарная доза $5 \cdot (10^4 - 10^6)$ Гр вызывает разрушение волокон загустителей и изменение свойств смазок.

5.4.8. Микробиологическая стабильность

Микробиологическая стабильность – стойкость смазок к изменению состава и свойств под действием микроорганизмов.

Для предотвращения микробиологического поражения смазок в них вводят бактерицидные препараты – антисептики (например, салициловую кислоту, фенолы, органические производные Hg, Sn и др.) и некоторые присадки. Этот показатель оценивают по отсутствию или росту грибков на поверхности пластичной смазки в чашках Петри либо на металлических пластинках.

ЛИТЕРАТУРА

1. McClintock, R. A. Laboratory study of wheel bearing grease high temperature life / R. A. McClintock // NLGI Spokesman. – 1980. – V. 43, No. 12. – P. 412–424.
2. Dev, E. Occhio ai perni sferici / E. Dev // Quattroruote. – 1979. – V. 24, No. 10. – P. 140–144.
3. Лавринович, М. Ф. Анализ долговечности деталей автомобилей семейства МАЗ и технические методы ее повышения / М. Ф. Лавринович, М. М. Шустерняк. – М.: НИИНАвтопром, 1981. – 56 с.
4. Гольд, Т. В. Карданы равных угловых скоростей: обзор / Т. В. Гольд, Б. М. Тверсков. – М.: НИИНАвтопром, 1967. – 40 с.
5. Консистентные смазки / Д. С. Великовский [и др.]. – М.: Химия, 1966. – 264 с.
6. Цуркан, И. Г. Исследование влияния количества смазки в буксе с роликовыми подшипниками на их работоспособность / И. Г. Цуркан, К. В. Мотовилов, Л. С. Елисеев // Тр. ЦНИИ МПС. – 1967. – Вып. 335. – С. 22–29.
7. Ваванов, В. В. Улучшение эксплуатационных свойств автомобильных смазок с помощью противоизносных и противозадирных присадок: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. В. Ваванов. – М.: МИНХ и ГП им. И. М. Губкина, 1979. – 21 с.
8. Стуканов, В. А. Автомобильные эксплуатационные материалы / В. А. Стуканов. – М.: Форум – Инфра-М, 2003. – 208 с.
9. Сентюрихина, Л. Н. Выбор консистентных смазок для подшипников электрических машин / Л. Н. Сентюрихина, М. В. Прокопов // Вестник электропромышленности. – 1961. – № 1. – С. 41–44.
10. Бейзельман, Р. Д. Подшипники качения: справочник / Р. Д. Бейзельман, Б. В. Ципкин. – М.: Машиностроение, 1968. – 235 с.
11. Сеницын, В. В. Подбор и применение пластичных смазок / В. В. Сеницын. – М.: Химия, 1974. – 414 с.
12. Сеницын, В. В. Пластичные смазки в СССР / В. В. Сеницын. – М.: Химия, 1984. – 192 с.
13. Гуреев, А. А. Автомобильные эксплуатационные материалы / А. А. Гуреев, Ю. Н. Шехтер, И. А. Тимохин. – М.: Транспорт, 1974. – 280 с.
14. Сеницын, В. В. Рациональное использование пластичных смазок / В. В. Сеницын, Н. Н. Гришин // Химия и технология топлив и масел. – 1980. – № 11. – С. 52–53.
15. Итинская, Н. И. Справочник по топливу, маслу и техническим жидкостям / Н. И. Итинская, Н. А. Кузнецов. – М.: Колос, 1982. – 208 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОК.....	5
2. РЕЖИМЫ РАБОТЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ И ТРАКТОРОВ, СМАЗЫВАЕМЫХ ПЛАСТИЧНЫМИ СМАЗКАМИ	7
3. СОСТАВ СМАЗОК	28
3.1. Дисперсионная среда	29
3.2. Дисперсная фаза	32
3.2.1. Мыла металлов	33
3.2.2. Углеводородные загустители	35
3.2.3. Неорганические загустители	35
3.2.4. Полимерные загустители	36
3.2.5. Модификация загустителей	37
3.3. Присадки и наполнители	37
4. ПРОИЗВОДСТВО ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК	40
5. ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ: СВОЙСТВА, ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ	44
5.1. Внешний вид и текстура смазок	45
5.2. Показатели работоспособности	45
5.2.1. Предел прочности на сдвиг и эффективная вязкость	45
5.2.2. Смазывающие свойства смазок	55
5.2.3. Испаряемость.....	58
5.2.4. Водостойкость	60
5.3. Стабильность смазок.....	64
5.3.1. Механическая стабильность и тиксотропные свойства	64
5.3.2. Коллоидная стабильность, синерезис	71

5.3.3. Адгезия и склонность к утечке	74
5.3.4. Термоупрочнение, или термическая стабильность	75
5.3.5. Химическая стабильность	77
5.3.6. Пенетрация	78
5.3.7. Температура каплепадения	81
5.3.8. Интервал рабочей температуры	83
5.3.9. Минимальная рабочая температура смазки	83
5.4. Другие показатели смазок	84
5.4.1. Содержание механических примесей	84
5.4.2. Содержание кислот и щелочей	84
5.4.3. Содержание воды	85
5.4.4. Противокоррозионные свойства	86
5.4.5. Защитные (консервационные) свойства	87
5.4.6. Биологическая разлагаемость	88
5.4.7. Радиационная стойкость	88
5.4.8. Микробиологическая стабильность	88
ЛИТЕРАТУРА.....	89

ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ ДЛЯ МАШИН ЛЕСНОГО КОМПЛЕКСА

Составители: **Симанович** Василий Антонович
Демидов Валерий Алексеевич
Арико Сергей Евгеньевич

Редактор *М. А. Юрасова*
Компьютерная верстка *М. А. Юрасова*

Подписано в печать 10.06.2011. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,3. Уч.-изд. л. 5,5.
Тираж 100 экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение:
УО «Белорусский государственный технологический университет».
ЛИ № 02330/0549423 от 08.04.2009.
ЛП № 02330/0150477 от 16.01.2009.
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.