

УДК 622.232:621.891

**А.П. Вержанский** д.т.н., проф., **М.С. Островский** д.т.н., проф.,  
**Ю.Ф. Набатников**, д.т.н., проф., **Я. М. Радкевич**, д.т.н., проф.,  
Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС»

e-mail: [kaftmr@mail.ru](mailto:kaftmr@mail.ru)

## **Триботехнические методы повышения надежности горных машин**

*В статье рассматриваются вопросы влияния триботехнических процессов на надежность горных машин и оборудования. Контактные взаимодействия деталей, происходящие при трении являются причиной ухудшения эксплуатационных свойств узлов и агрегатов машин. Наиболее неблагоприятным при этом является граничный режим трения. В связи с чем, в статье приводятся основные положения молекулярной физики граничного трения.*

*Одним из наиболее опасных процессов, происходящих при контактном взаимодействии, является фреттинг. Приведен механизм возникновения фреттинга и указаны факторы на него влияющие. Показано, что развитие фреттинга приводит к существенному снижению усталостной прочности деталей. Эффективным путем снижения фреттинга является правильный выбор состава смазочных материалов. Основными требованиями к смазочным материалам для этого является низкий коэффициент трения и повышенная износостойкость при малых скоростях скольжения (порядка нескольких мм/с).*

*Добавки к маслам, появившиеся за последнее десятилетие на отечественном и зарубежном рынке позволяют решить эту задачу. К числу наиболее перспективных добавок относятся высокодисперсный серпентин и наночастицы алмаза. Такие добавки при внесении их в масло в незначительном количестве (порядка 0,05 % по массе) приводят к формированию на поверхности деталей в зоне контакта алмазоподобной углеродной пленки, обладающей весьма хорошими триботехническими характеристиками. Применение подобных добавок к маслам позволяет эффективно восстанавливать изношенные детали. В частности, ответственные элементы двигателей внутреннего сгорания. Современные достижения триботехники способствует эффективному повышению ресурса машин и оборудования.*

**Ключевые слова:** горные машины, надежность, триботехнические процессы, фреттинг, граничное трение, присадки, добавки к маслам.

**A.P. Verzhanskiy, M.S. Ostrovskiy, J.F. Nabatnikov, J.M. Radkevich**

## **Tribotechnical Methods for Enhancement of Mining Machine Reliability Lead**

*In the article the issues of influence of tribotechnical phenomena on reliability of mining machine and equipment is considered. Contact interaction of parts under friction is the reason of degradation of performance characteristics of assemblies and aggregates of a machine, and thereat boundary friction is the most negative one. Therefore, in the article the basics of molecular physics for boundary friction is presented.*

*Fretting is one of the most dangerous phenomena that take place under contact interaction. In the article the process of fretting is described and fretting impact factors are specified. It is clearly demonstrated that growth of fretting results to significant degradation of endurance strength of parts. Correct selecting of lubricant composition is effective way of fretting decreasing. For this purpose, the basic requirement to lubricants is low friction factor and enhanced endurance at low sliding speeds (about several mm/s).*

*Oil additives appeared during last decade at domestic and international market do allow resolving this task. Fine-grained serpentine and diamond nanoparticles are among the most promising additives. Adding insignificant quantity thereof (about 0.05% in mass) into oil results to appearing on a surface of a machine part in the contact area of diamond-type carbon layer that has pretty good tribotechnical characteristics. Application of such oil additives does allow restoring worn-down parts effectively and helps to enhance service life of machines and equipment.*

**Key-words:** *mining machines, reliability, tribotechnical phenomena, fretting, boundary friction, feedings, oil additives.*

Основной причиной отказа горных машин является повышенное изнашивание их трибосопряжений [2, 3]. Правильный выбор смазочных материалов играет исключительно важную роль для обеспечения эксплуатационной надежности горных машин и оборудования. Поэтому смазочную среду следует считать равноправным элементом конструкции машины. Вместе с тем, если к выбору состава и марок сталей для изготовления деталей горных машин, как и технологическим процессам улучшения их свойств, отношение достаточно серьезное, то обоснование выбора смазочного материала часто желает более внимательного отношения.

По данным фирмы «Фиат» долговечность двигателей внутреннего сгорания за последние годы увеличилась более чем на 50% только за счет повышения качества применяемых моторных масел. При этом улучшение качества моторных и трансмиссионных масел позволяет не только увеличить моторесурс двигателей, но и снизить расход моторного топлива.

Как показано в работах Первого и последующих Европейских конгрессов по трибологии, а так же конференции «Трибология -

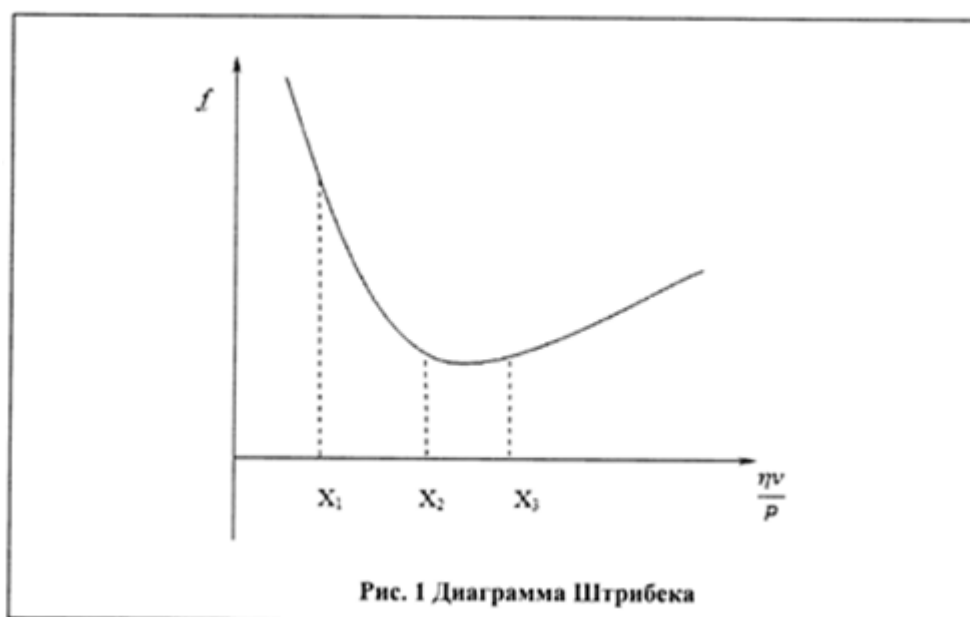
машиностроению» института Машиноведения РАН, экономический эффект в современном машиностроении достигается в значительной степени благодаря правильному выбору масла и присадок к нему, применения новых типов покрытий. В решении конгресса отмечается, что в значительной мере этот путь повышения качества машин сдерживается отсутствием надежных, применимых в условиях эксплуатации методов, критериев и приборов оценки служебных свойств смазочных материалов с точки зрения влияния их на долговечность деталей. Следует иметь в виду, что подбор смазочного материала, выбор присадки к нему, его рецептура, так же как тип покрытия должны осуществляться индивидуально с учетом конструкции, условий работы, характера движения и режимов нагружения узлов трения, с учетом технического состояния машины [2,3].

В настоящее время хорошо известно, что введение в смазывающую среду специальных легирующих присадок и добавок даже в незначительных количествах (процентные доли массового состава) может приводить к многократному повышению показателей надежности узлов трения горных машин, а в некоторых случаях, за счет введения нужных присадок удается путем «залечивания» повреждений восстанавливать работоспособность изношенных деталей [8].

За последние десятилетия получили большое развитие методы модификации свойств поверхностных слоев деталей, в частности, путем нанесения покрытий различной физической природы. Однако дальнейшие успехи в упомянутых выше областях требуют как более глубокого осмысления физики процессов, протекающих на поверхности твердого тела, так и развития экспериментальных методов исследования свойств поверхностных слоев. На рис.1. изображена так называемая кривая Штрибека, т.е. зависимость коэффициента трения  $f$  от величины  $\frac{\eta v}{p}$ , которая по смыслу соответствует толщине слоя смазки, разделяющей трущиеся поверхности. Здесь  $\eta$  – коэффициент вязкости,  $v$  – скорость,  $p$  – давление.

Эта кривая позволяет все огромное многообразие процессов внешнего трения, встречающиеся в технических системах, классифицировать на следующие явления. Слева от  $X_1$  – трение, так называемых «ювенильных», т.е. физически свободных от внешних молекул поверхностей. Это область действия межмолекулярного взаимодействия между трущимися поверхностями.

Трение здесь очень велико, оно сопровождается адгезионным схватыванием поверхностей. В технических устройствах этот вид фрикционного взаимодействия может реализовываться на отдельных локальных участках фактической площади контакта. Такого характера взаимодействия в узлах трения необходимо всячески избегать.



Справа от  $X_3$  находится область гидродинамического трения, где согласно закону Ньютона, трение пропорционально градиенту скорости. Основной характеристикой смазочной среды в этой области является вязкость, как ее важнейшее физико-химическое свойство.

Область  $X_1 - X_3$  охватывает широкую и технически важную область физико-химических условий трения, представляющих граничное трение. Это область между трением весьма чистых (ювенильных) поверхностей и гидродинамическим трением. Здесь антиизносная активность смазочной среды характеризуется иным, нежели при гидродинамическом режиме, комплексом физико-химических свойств молекул среды.

Существуют два рубежных режима граничного трения:

- $X_1$  – переход от трения несмазанных «чистых» поверхностей к граничному;
- $X_2$  – переход от граничного трения к гидродинамическому.

В узлах трения машин обычно реализуются смешанные режимы трения.

Наибольший практический интерес для обеспечения надежности оборудования представляет граничный режим трения [1]. Большой вклад в развитие науки о граничном трении внесли А.С. Ахматов, Б.В. Дерягин, П.А. Ребиндер, В. Гарди, Ф. Боуден и др. Вкратце изложим основные положения теории граничного трения:

1. Поверхность твердого тела как граница раздела различных фаз имеет структурные особенности кристаллических решеток зерен и, главное, является носителем значительного запаса свободной энергии. Это обуславливает высокую адсорбционную способность поверхности металла. Можно сказать, что поверхность является ареной действия

молекулярных сил, быстро убывающих с расстоянием от поверхности. Расчет поля молекулярных сил, действующего вблизи поверхности, в середине прошлого века выполнил Е.М. Лившиц, а опытное измерение сил молекулярного взаимодействия осуществили Б.В. Дерягин и И.И. Абрикосова. С этой целью ими был изобретен очень чувствительный прибор – «весы с обратной связью». Удивительно, но этот прибор в своей основе является прототипом самого современного прибора - атомного силового микроскопа.

2. Длинноцепочечные молекулы органических соединений (таких как жирные кислоты  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ ), которые часто используются в качестве присадок к органическим смазочным маслам, попадая в поле действия молекулярных сил твердой фазы, приобретают квазикристаллическую структуру – переходят в квазитвердое состояние.

3. Тонкие мультимолекулярные слои, адсорбированные на поверхности твердого тела (толщиной порядка 10-100нм) обладают аномальными физико-механическими свойствами: резко выраженной анизотропией, упругостью формы, модуль упругости их порядка сотен МПа, очень высокой прочностью на сжатие и относительно низким модулем сдвига.

4. В находящимся в щели между контактирующими поверхностями слоях третьей фазы в результате фрикционного взаимодействия могут происходить существенные изменения. В частности под действием механических напряжений возможны разрывы цепочек молекул с образованием радикалов, что приводит к химическим поверхностным превращениям и образованиям вторичных защитных пленок. Возможны механохимические процессы взаимодействий металлических поверхностей с жирными кислотами. В результате таких химических реакций на поверхности могут возникать металлические мыла. Такие пленки толщиной наноразмеров могут существенно снижать трение и во много раз уменьшать износ.

5. В процессе трения и изнашивания по мере локального разрушения граничных слоев возможна их регенерация путем поверхностной миграции молекул, а так же других возможных физико-химических процессов, вызывающих воздействие поверхностно-активных молекул, и «залечивание» дефектных слоев.

6. Поверхность твердого тела изобилует различного рода дефектами микроскопического и субмикроскопического масштаба, которые проявляются часто в виде микрощелей и микротрещин. Такие микротрещины, как показывают исследования, находятся в коммуникационной связи с дефектами кристаллической решетки внутри металла. Это обуславливает возможности проникновения молекул смазки на «внутренние» поверхности твердых тел и обратно.

7. В чисто техническом отношении молекулярные взаимодействия, приводящие к формированию граничных слоев важны не только с точки зрения трения и изнашивания деталей машин, но и часто играют решающую роль в технологических процессах обработки резанием, обработки методом поверхностного пластического деформирования, получения соединений с натягом, прокатки металлов и др. Однако, часто при этом структура и свойства поверхностных граничных слоев не принимаются во внимание, а физико-химические процессы, вызывающие их формирование, игнорируются.

Таким образом, совершенно очевидно, что фундаментальным вопросом в обеспечении качества смазочных материалов в граничном режиме терния является изучение структуры и физико-механических свойств тонких поверхностных слоев.

Структура и свойства граничных слоев зависят от большого количества факторов: состава и состояния твердой поверхности, состава смазочной среды, наличия в ней поверхностно-активных присадок, температуры, скорости, давления и др.

Для изучения граничных слоев на поверхности твердого тела применяются методы тонкого физического анализа: рентгеновская дифрактометрия, электронная микроскопия, силовой атомный микроскоп, метод контактной разности потенциалов, измерение электропроводности, оптические методы, эллипсометрия и др. С этой целью нами разработан и предлагается метод вибротрибометра [4].

Одним из наиболее опасных и часто в инженерной практике нераспознанным процессом, наблюдаемом при контактном взаимодействии, является фреттинг [5]. Фреттинг – это процесс, возникающий при циклическом нагружении в зоне контакта сопряженных деталей. Величина амплитуды относительных перемещений в зоне контакта деталей, достаточная для возникновения процесса, находится в пределах упругих деформаций поверхностного слоя детали. Максимальная величина амплитуды может составлять 200-300 мкм. Фреттинг–коррозия наблюдается при контакте металлов и при контакте металлов с неметаллами. Особенно ярко проявляется фреттинг-коррозия в малоподвижных и прессовых соединениях: болтовых, шлицевых, замковых, фланцевых соединениях, местах напрессовки подшипников на вал и т.п., а также в электрических контактах.

Наиболее тяжелые последствия этого процесса – фреттинг-усталость, т.е. усталостные разрушения деталей, поврежденных фреттинг-коррозией. Предел выносливости соединения при этом может снижаться в 1,5...5 раз. Это касается, прежде всего, прессовых и малоподвижных соединений.

Механизм фреттинга по своим характерным признакам относится к наиболее разнородным по своей природе процессам, включающим: физико-химические, протекающие на молекулярном уровне с

образованием в зоне реального контакта окислов металлов сопряженных деталей (фреттинг-коррозия); механические процессы разрушения и абразивного износа в зоне контакта в субмикроскопических и макроскопических объемах поверхностного слоя деталей [6].

Эти процессы тесно связаны между собой, с преобладанием того или иного механизма на различных этапах и при разных соотношениях параметров процесса, как правило, изменяется и по-разному влияет на сопротивление усталости (фреттинг-усталость) конструкционных материалов и деталей. Отделяющиеся при фреттинге мельчайшие частицы материала обладают очень высокой энергией, поэтому для появления окислов достаточно наличие следов кислорода. В большинстве случаев твердость образующихся окислов существенно отличается от твердости материалов деталей.

Роль химического фактора оценивается по результатам взаимодействия неоднородных конструкционных материалов в различных средах, отличающихся химической активностью, или используется ряд химической активности Вольта. Показано, что корреляции механических свойств материалов по параметру твердости и сопротивлением фреттинг-усталости слабая: в частности, при одних и тех же параметрах процесса фреттинга (величине амплитуды относительных перемещений сопряженных поверхностей и величине давления в зоне контакта) повреждаемость по износу поверхности контакта стали 13ХН2В2МФ, отпущенной на твердость НВ=2800 МПа, выше, чем при отпуске на НВ=3100 МПа, а степень снижения предела выносливости при этом оказывается незначительной. Это связано с преобладанием в первом случае процессов абразивного износа, при котором удаляются слои с начальными усталостными микротрещинами. Во втором – процессы схватывания материалов благоприятствуют образованию и развитию усталостных микротрещин.

С точки зрения химической активности, результаты изучения поведения материалов в искусственно создаваемых условиях окисления и электрохимической коррозии показали, что на разных стадиях процесса фреттинга характер коррозионных процессов изменяется: на начальной стадии преобладают процессы окисления, связанные с высокой энергетической активностью свободных ювенильных частиц материала и поверхности деталей, освобождающихся от окисных пленок. При избытке кислорода происходит пассивация поверхности. На следующей стадии возрастает роль электрохимических процессов, связанных с усилением коррозии из-за катодного деполяризатора (кислорода).

Металлографические оптические и электронномикроскопические исследования показывают, что тонкие поверхностные слои в зоне фактического контакта находятся в высокодисперсном состоянии, включающем ювенильные частицы и окислы материалов контактирующих

пар. Состав и свойства окислов в зоне контакта при воздействии циклических нагрузок существенно отличаются от окислов, образующихся при окислении материалов в стационарных условиях.

Известные положения о моделях процесса обычно основаны на зависимости интенсивности процесса, как функции потери массы, от механических параметров процесса: скорости относительного перемещения, величины давления в зоне контакта, величины амплитуды и частоты перемещений, природы материалов сопряженных пар.

Основываясь на принципах равновесной термодинамики, иногда дополнительно учитывают физические и химические свойства взаимодействующих материалов. Однако, модели, эффективные для методик изучения процессов износа, не применимы для прогнозирования влияния фреттинг-коррозии на сопротивление усталости [6].

Анализ самих методик, применявшихся для изучения процессов износа, показал, что большинство из них при исследовании фреттинга некорректны, как и получаемые с помощью этих методик результаты, т.к. значения основных параметров процесса фреттинга (амплитуда, давление и др.) на один-два порядка меньше, чем при процессах износа, и они не допускают косвенных оценок, а требуют прямых замеров. В их основу закладывались традиционные методы изучения механизма износа при трении-скольжении, где степень повреждения оценивалась по изменению массы образцов, профиля поверхности контакта и т.д. Работ, в которых исследовались связь между параметрами процесса фреттинга и сопротивлением усталости очень мало.

Если для многих высокопрочных конструкционных материалов наблюдается соблюдение принципа суперпозиции: близость результатов испытаний на усталость образцов, предварительно поврежденных фреттингом, с результатами прямых испытаний на фреттинг-усталость, то для некоторых материалов, например, титановых сплавов, имеются существенные различия результатов при подобных испытаниях на усталость. Это свидетельствует об особенностях механизма повреждения у разных конструкционных материалов при фреттинге и при фреттинг-усталости, что свидетельствует о несправедливости обобщенного применения принципа суперпозиции повреждений в случае фреттинг-процесса. Об этом свидетельствуют результаты исследований зависимости сопротивления фреттинг-усталости от природы материала сопряженных пар, их механических свойств, твердости и т.д., т.к. при фреттинге независимо друг от друга протекают абразивные, адгезионные, химические и усталостные процессы, связанные с механическими повреждениями зон контакта. Кроме того, могут иметь место и электрохимические процессы, при которых между материалами сопряженных пар или их структурными составляющими могут возникать гальванические пары.



Для ряда высокопрочных конструкционных сталей и сплавов получены зависимости для коэффициента влияния фреттинг-коррозии на предел выносливости от амплитуды относительных перемещений  $A_r$  и от величины давления в зоне контакта  $p$ . Наибольшее снижение предела выносливости наблюдается при таких сочетаниях  $A_r$  и  $p$ , когда в зоне контакта абразивные повреждения минимальны ( $A_r = 5 \div 10$  мкм), а наименьшее – при  $A_r \gg 20$  мкм.

Рассматривая процесс фреттинга с точки зрения механики деформируемого твердого тела, можно считать его одним из видов контактного взаимодействия тел, например, как частный случай контакта полусфер или полуцилиндров при наличии нормальной и касательных составляющих. Возникающее в контактах напряженное состояние является сложным, где действуют одновременно составляющие от нормальных напряжений сжатия и от сил трения, способствующих образованию знакопеременных касательных напряжений.

Таким образом, элементарный объем материала в зоне контакта находится в условиях трехосного напряженного состояния и подвергается циклическому деформированию. При этом возникает градиент напряжений по глубине слоя.

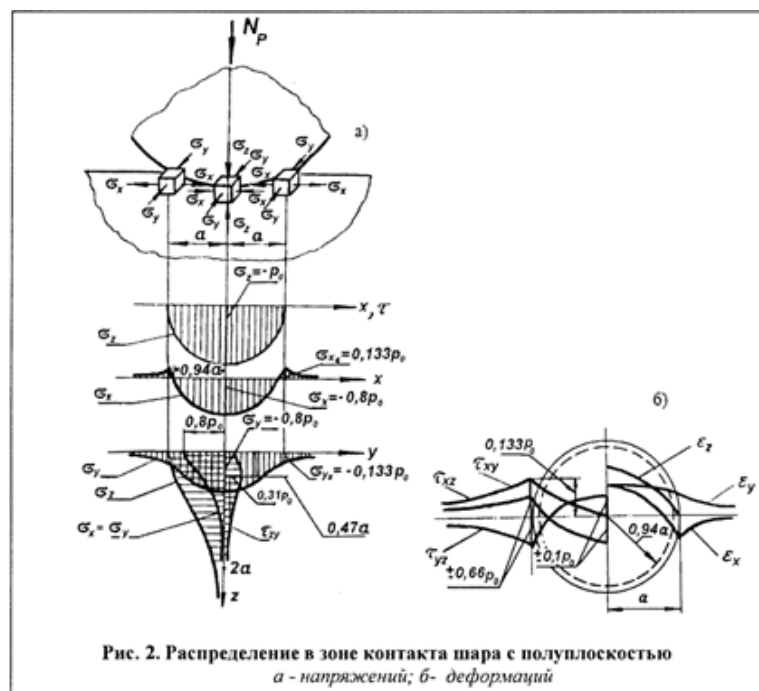


Рис. 2. Распределение в зоне контакта шара с полуплоскостью  
а - напряжений; б - деформаций

Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с изучением напряженного и деформированного состояния при локальном контакте тел, показывают, что наиболее напряженными являются две зоны: зона крайнего поверхностного слоя, располагающаяся на некоторой глубине, и зона, где касательные напряжения достигают максимума (рис. 2 а). При некоторых внешних условиях нагружения обе зоны смыкаются.

При циклическом изменении сил поверхности возникает возвратное проскальзывание в пределах контактной площадки и значительное воздействие сил трения, способствующее циклическим изменениям напряженного состояния во всех микрообъемах материала по площадкам фактического контакта (рис.2 б). Микро и макронеровности, существующие на рабочих поверхностях деталей, вызывают значительные изменения контактных напряжений в поверхностном слое площади контакта, которые не учитываются при решении общей контактной задачи. Процесс проскальзывания приводит к уменьшению местной концентрации напряжений и подобен началу пластической деформации в упругих телах. Преодоление сил трения способствует диссипации энергии, проявляясь как источник конструктивного демпфирования и фреттинга.

Учитывая дискретность контакта реальных деталей, определяемую шероховатостью поверхности, можно утверждать, что в зоне контакта всегда найдутся микро и макрообъемы в виде выступов, где максимальные эквивалентные циклические напряжения превысят либо предел прочности материала, либо величину ограниченного предела выносливости. Следовательно, при соответствующем числе циклов нагружения на поверхности контакта будут иметь место статические, квазистатические, малоцикловые и усталостные разрушения материала. Эти процессы в сочетании с физико-химическим взаимодействием материалов, окислами, могут интенсифицироваться или тормозиться, являясь постоянными источниками образования свободных микрочастиц и окислов, участвуя в разрушении микрообъемов материала, образовании каверн и микротрещин.

Возникающие повреждения в поверхностном слое играют роль концентраторов напряжений или начальных трещин (рис. 3), дальнейшее развитие которых может в отдельных случаях прогнозироваться по законам линейной механики разрушения.

Силовое воздействие в контакте поверхностей (локальные участки при реальном контакте) находящихся, как правило, номинально в трехмерном напряженном состоянии и в условиях возврата колебательных перемещений (изгибных, крутильных, поступательных и т.д.), способствует возникновению микро- и макротрещин, которые становятся очагами разрушения от фреттинг-усталости при воздействии на детали даже умеренных по величине переменных напряжений. Результатом взаимодействия твердых частиц окислов с поверхностью контакта сопряженных деталей является образование глубоких каверн (рис. 3).

Результаты экспериментальных исследований показывают, что развитие усталостных трещин, соизмеримых с размерами структурных составляющих материала, не подчиняется закономерностям развития справедливым для сравнительно длинных трещин. Предел выносливости

при фреттинге в зависимости от материала контактирующих пар, условий в зоне контакта (наличия покрытий, упрочнения и т.д.) вида нагружения и величины нагрузок может достигать значений  $(0,60 \div 0,15) \sigma_{-1}$  – предела выносливости при обычной многоциклового усталости.



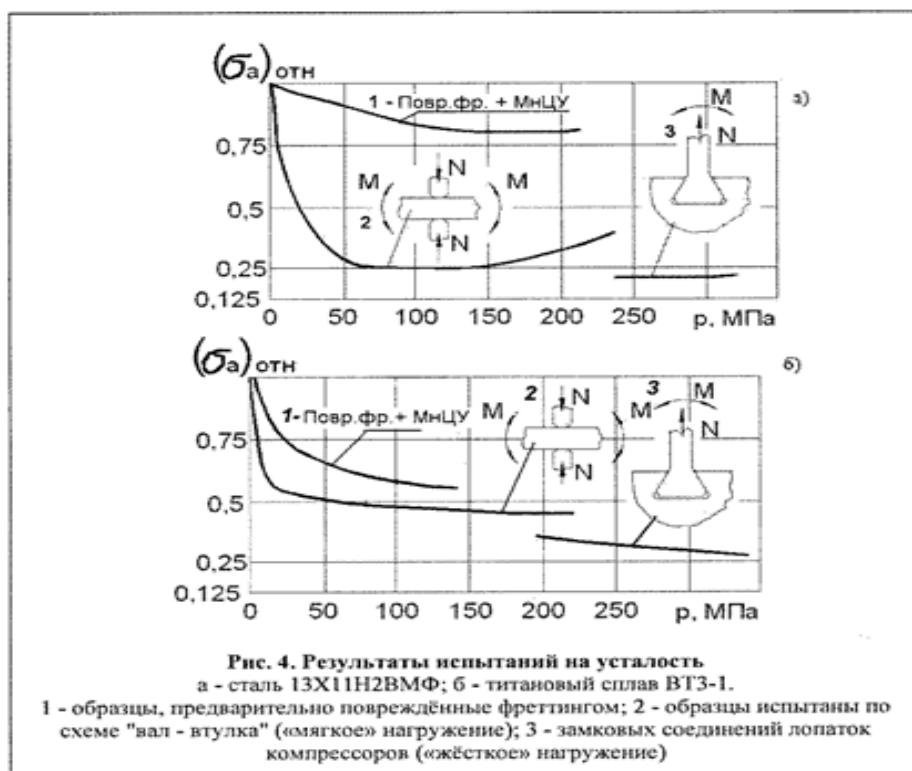
На рис. 4 приведены результаты испытаний образцов, предварительно поврежденных фреттингом при заданной величине  $p$  (кривые 1), образцы по схеме вал-втулка (кривые 2) и детали (замковые соединения – кривые 3) на фреттинг-усталость.

Кривые на рис. 4а получены для стали 13Х11Н2ВМФ, на рис. 4б, для титанового сплава ВТ3-1.

Как было показано, по результатам испытаний образцов, предварительно поврежденных фреттингом, можно получить представление о влиянии на предел фреттинг-выносливости величины давления  $p$  в зоне контакта, учитывать особенности напряженного состояния детали, а также судить об эффективности применяемых технологических мероприятий.

Важно отметить, что при фреттинге в виду малой величины скорости относительного движения реализуется граничный режим трения, основные характерные черты которого отмечены выше. Поэтому при фреттинге наиболее заметно проявляется влияние присадок и добавок к маслам, приводящих к значительному изменению триботехнических характеристик.

Поэтому при фреттинге наиболее заметно проявляется влияние присадок и добавок к маслам, приводящих к значительному изменению триботехнических характеристик. В последнее десятилетие на рынке появился большой ассортимент различных веществ, рекламируемых как эффективные присадки и добавки к маслам. Хотя не все они приводят к ожидаемым результатам и не являются панацеей для всех условий работы, некоторые из них показывают выдающиеся результаты.



Как уже отмечалось нами, процессы контактного взаимодействия при трении весьма многообразны. Они включают механическое контактирование, вызывающее упругое и пластическое деформирования микровыступов шероховатых поверхностей, физическую адсорбцию, химические превращения и электрические явления, происходящие в зоне контакта, термические и диффузионные явления. Введение присадок и добавок в смазочную среду может существенно изменять протекание этих процессов, интенсивность их проявления и, таким образом, оказывать влияние на ресурс трибосопряжения.

Нанотехнологический метод модифицирования поверхностных свойств деталей за счет нанесения углеродных покрытий – ориентантов для повышения смазочной способности масел разработан и исследован Буяновским И.А., Левченко В.А. и др. [7]. Монокристаллические пленки углерода толщиной до 3 мкм ими были получены методом импульсной конденсации углеродной плазмы с дополнительным облучением ионами аргона. Показано, что монокристаллическое углеродное покрытие повышает смазочные свойства граничных слоев и способствует снижению коэффициента трения и износа стальных пар трения.

Исследования, проведенные в конце 80-х годов в институте «Механобр» убедительно показали, что тонкодисперсные серпентиниты (названные ГМТ- геомодификаторами трения) в малых количествах вводимые в смазочную среду (до 0,05% по массе) могут служить эффективными антифрикционными добавками к смазкам и продлевать ресурс узлов трения горнопроходческого оборудования в два и более раза.

Механизмы действия ГМТ автор объясняет так [11]: в силикативных геомодификаторах типа серпентина имеются силоксановые мостиковые связи Si-O-Si, при разрыве которых вследствие измельчения минерала в процессе трения образуются некомпенсированные оборванные связи Si-O- или Si-O+, являющиеся активными акцепторами водорода в форме H<sup>+</sup> или H<sup>-</sup>. При их взаимодействии образуются скомпенсированные силанольные группы Si-OH. Поэтому, тонкоизмельченный серпентин, обладающий большой удельной поверхностью и большим числом оборванных силоксановых связей, создает условия для связывания в зоне трения активного водорода, предотвращая его взаимодействие с металлом и устраняя водородное изнашивание.

Мы полагаем, что улучшение триботехнических характеристик смазочной среды при введении ГМТ обусловлено образованием тонких поверхностных пленок в зоне контакта, которые имеют высокую адгезию с поверхностью металла и обладают ламелярной структурой. Структурная формула серпентина может быть выражена в виде



Процесс деструкции серпентина при контактном взаимодействии может вызывать образование тонкодисперсного форстерита (Mg<sub>2</sub>)SiO<sub>4</sub> и кремнезёма SiO<sub>2</sub>. Эти частицы обладают высокой адсорбционной способностью. Поэтому поверхностно активные вещества, присутствующие в смазочном веществе, переносятся ими в локальные области фактического контакта. Открывающиеся же при контактном взаимодействии участки ювенильной поверхности металла при этом оказывают каталитическое влияние на формирование защитных поверхностных слоев. Вообще же, как показывают рентгенодифрактометрические и электронографические исследования, триботехнические покрытия, образуемые серпентинами в результате физической и химической адсорбции, трибополимеризации вследствие многостадийных физико-химических процессов, происходящих в зоне трения, могут обладать аморфной, слоистой, пористой и многокомпонентной структурой. Оже-спектроскопия показала, что в состав таких покрытий входит в большом количестве углерод (более 30%).

Большой интерес в последнее время проявлен к попыткам применения в качестве добавок к маслам наночастиц различной природы. Условно принято относить к наномасштабам дисперсные частицы твердого вещества или дискретных элементов структуры материала, когда они хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм (0,1 мкм). Известно, что в столь измельченном состоянии вещество демонстрирует уникальные особые свойства, обусловленные высокой поверхностной энергией таких частиц, которая во много раз превосходит внутреннюю энергию, обусловленную взаимодействием атомов в глубине вещества. [9]

Наличие наночастиц, обладающих высокой активностью, в зоне трения оказывает сильное влияние на физико-химическое взаимодействие трибосреды с поверхностью деталей, в том числе на процессы адсорбции, хемосорбции, диффузии, электрические и ионообменные процессы, возникающие в зоне контакта при трении.

Наиболее изученными в качестве добавок к маслам являются:

- наноалмазы с размером частиц 4...10 нм;
- трибопрепараты “Evo®lution”. [10]

Многочисленными исследованиями, проведенными как в нашей стране, так и за рубежом подтверждено, что наилучший триботехнический эффект достигается в тех случаях, когда введение наночастиц приводит к возникновению на поверхности алмазоподобных пленок – DLC-покрытий (Diamond – Like Carbon Coating).

В настоящее время на базе высокоэффективных добавок к маслам разработан так называемый «безразборный метод ремонта» двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [9]. С этой целью предложены ремонтно-восстановительные смеси – РВС, добавляемые в требуемом количестве в моторное масло. За счет этого на изношенных трущихся поверхностях формируются слои достаточной толщины (десятые доли микрона) для улучшения эксплуатационных характеристик ДВС.

РВС-обработка наиболее эффективна для судовых, транспортных и автотракторных дизелей, агрегатов силовых передач. Имеется ряд положительных результатов «ремонта» стационарных гидроагрегатов. РВС-трибопрепарат вводят в масло агрегатов, частично в цилиндры ДВС, еще реже во впускной воздушный тракт, когда ведутся работы по «ремонту» топливной аппаратуры. Имеются примеры уверенного «ремонта» дизельной топливной аппаратуры.

Вот некоторые примеры эффективности РВС-технологии:

- дизелю трактора К-701, отработавшему после капремонта 18 мес (израсходовано 30836 л топлива), предназначенному к капремонту с заменой ЦПГ, трехкратным введением РВС-препарата продлена эксплуатация на 20 мес (израсходовано еще 46 тыс. л топлива);

- имеется диплом пробега Москва-Питер-Москва машин без масла в моторах. Предварительно моторы были обработаны препаратом «Форсан»;

- редуктор тяговой тележки тепловоза нормально проработал без масла почти год в тяжелых угольных маршрутках на станции Лесная Забайкальской железной дороги.

Таким образом, за счет применения достижений современной триботехники возможно эффективное повышение ресурса машин и оборудования.

### Список литературы

1. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения.–М.: «Физматгиз», 1963, 472 с.
2. **Солод Г.И., Радкевич Я.М.** Управление качеством горных машин. Учебное пособие.–М.:МГИ, 1985, 237 с.
3. **Докукин А.В., Семенча П.В., Голодбухт Е.Е., Зислин Ю.А.** Повышение прочности и долговечности горных машин. – М.: Машиностроение, 1982, 224 с.
4. **Островский М.С.** Применение виброметрии для оценки смазочных материалов и защитных покрытий./ Современные технологии в горном машиностроении. Сборник научных трудов.–М.: МГГУ, 2013, с.224-236.
5. **Островский М.С.** Фреттинг как причина снижения надежности горных машин./ Современные технологии в горном машиностроении. Сборник научных трудов.–М.: МГГУ, 2011, с.214-228.
6. **Петухов А.Н.** Фреттинг и фреттинг-усталость конструкционных материалов и деталей./ Современные технологии в горном машиностроении. Сборник научных трудов.–М.: МГГУ, 2014, с.285-295.
7. **Буяновский И.А., Левченко В.А.** и др. Нанотехнологии XXI века: углеродные покрытия, обеспечивающие повышение антифрикционных свойств./ Трение и износ. 2005, Т.26, №1, с.53-56.
8. **Фролов К.В.** Современная трибология. Итоги и перспективы.–М.: ЛКИ, 2008, с.354.
9. **Дунаев А.В.** Состояние применения нетрадиционной триботехники для безремонтного восстановления сопряжений трения узлов и агрегатов машин и оборудования./ Современные технологии в горном машиностроении. Сборник научных трудов.–М.: МГГУ, 2012, с.154-163.
10. **Сокол С.А.** DLC пленки на поверхностях трения. / Современные технологии в горном машиностроении. Сборник научных трудов.–М.: МГГУ, 2011, с.279-287.
11. **Зуев В.В.** Конституция, свойства минералов и строение земли (энергетические аспекты) – СПб.: Наука, 2005, 400 с.