

УДК 621.833.1:539.421:541.183

**МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ КОНТАКТНОЙ УСТАЛОСТИ
С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ ОБЪЕМНОГО ЗАПОЛНЕНИЯ****канд. техн. наук, доц. Л.В. ПЕРВИЦКИЙ
(Полоцкий государственный университет)**

Рассмотрены основополагающие разделы теории объемного заполнения, разработанной профессором В.А. Астаховым и академиком М.М. Дубининым. На основании указанной теории физики граничного трения, физики разрушения и строения твердых тел рассмотрены механизмы формирования граничных слоев на рабочих поверхностях зубьев зубчатых колес и на полостях трещин. Указано на то, что в микротрещинах на начальной стадии гидродинамические процессы происходят не могут и рост трещин до макроскопических размеров и до образования ямок выкрашивания происходит в результате сжатия и расклинивающего адсорбционного эффекта у вершин трещин. Показано, что при соответствующем подборе смазочных материалов возможно повысить работоспособность зубчатых передач.

Введение. Одним из наиболее распространенных видов деталей машин, от надежности и долговечности которых зависит работоспособность машин и механизмов, являются зубчатые колеса. Поэтому исследования, связанные с изучением факторов, влияющих на работоспособность зубчатых передач, разработкой методов повышения их работоспособности, являются актуальными. Выход из строя зубчатых колес в закрытых передачах, как правило, происходит в результате разрушения рабочих поверхностей зубьев, т.е. питтинга. Вопросам питтингообразования посвящено большое количество работ отечественных и за рубежом авторов, в частности А.И. Петрусевича, Ч.Г. Трубина, В.Н. Кудрявцева, М.М. Саверина, Ланчестера, Боудена, Бакингема, Вейя и других, однако предложенный механизм разрушения констатировал усталостный характер питтингообразования и не учитывал физико-химические и химико-физические процессы, происходящие на контактирующих поверхностях.

В активных средах [1] прочностные характеристики металлов как при статическом, так и при циклическом нагружении снижаются. Поэтому вопросы контактной усталости и механизм образования и роста трещин при контактной усталости неотделимо связаны с механикой взаимодействия смазочных материалов с рабочими поверхностями зубьев зубчатых колес и качеством самих поверхностей.

Исследовательская часть. Поверхность металла при микроскопическом изучении представляется чрезвычайно сложной [2]. При таких методах изучения рельеф поверхности определяется прежде всего видом механической обработки. Изучение состояния поверхности при больших увеличениях с применением электронных микроскопов позволяет выйти за пределы геометрических размеров неровностей поверхности, возникающих в результате механической обработки, и приводит к заключению, что картина рельефа поверхности, являясь еще более сложной, определяется кристаллическим строением металла.

При изучении адсорбционных явлений различают внешнюю и внутреннюю поверхности. Первая из них лежит в границах номинальной поверхности, определяемой макрогеометрическими параметрами данного металла и доступна для прямых исследований. Внутренняя фазовая поверхность металла образована внутри объема системой разнообразнейших дефектов. Границу, отделяющую эти два типа поверхности, приходится проводить произвольным образом. Так, во внешнюю поверхность можно включить поверхности всех выступов и тех трещин, глубина которых меньше их ширины. Тогда внутренняя поверхность будет включать стенки трещин, пор и полостей, глубина которых больше ширины.

Таким образом, между внешней и внутренней фазовыми поверхностями металла не существует никакой физической границы, так как одна из них непосредственно переходит в другую.

Устья многочисленных микрощелей и трещин различной геометрической формы, существующие в массе металла и выходящие на его внешнюю поверхность, служат такой областью перехода.

Важным фактором при изучении механизма взаимодействия смазочных масел с поверхностью твердых тел является различие физических свойств металла, которые имеются между его поверхностными слоями и объемами. Эти различия минимальны лишь в том нереальном случае, когда поверхность металла никогда не вступала во взаимодействие с внешней средой и не подвергалась тем или иным видам обработки. Но, видимо, даже при таких условиях поверхность металла на границе с вакуумом должна иметь некоторые структурные особенности, а что особенно важно, должна обладать значительным запасом свободной энергии и, следовательно, особо высокой адсорбционной способностью.

В тех случаях, когда металл подвергается механической обработке, свойства и структура его поверхностных слоев коренным образом изменяются, и эти изменения, распространяющиеся иногда на значительную глубину, зависят как от исходных свойств металла, так и от методов и режимов механической обработки. Основной причиной нарушения объемных свойств в его поверхностных слоях является напряженное состояние, влекущее за собой пластические деформации, и повышение температуры.

Пластические деформации сопровождаются пластическим течением металла, размазыванием его по поверхности, что приводит к полному разрушению начальной структуры и образованию слоя деформированных зерен.

С точки зрения физических свойств поверхности необходимо выделить два явления: высокодисперсное строение слоев Бейльби и наличие слоев металла, построенных из зерен с искаженным кристаллическим строением. Это объясняется прежде всего тем, что в слоях Бейльби имеет место сильное развитие фазовых поверхностей металла, и поэтому все физико-химические процессы на таких поверхностях протекают более интенсивно. Кроме того, слои Бейльби характеризуются повышением объемной плотности свободной энергии металла. Искажение строения кристаллической решетки эквивалентно увеличению запаса потенциальной энергии в поверхностных слоях. Такие поверхности характеризуются значительным повышением их адсорбционного потенциала.

Соприкосновение металла с внешней средой приводит к адсорбции атомов и молекул среды на внешней и внутренней поверхностях. Поэтому в реальных условиях поверхность металла всегда несет на себе сложную систему адсорбционных слоев. Согласно работе [2] строение поверхностных и подповерхностных слоев реальных металлов следующее: первичная объемная структура металла, зона деформированного металла, слой окислов металла, адсорбционный слой газов, адсорбционный слой воды, адсорбционный слой полярных молекул органического вещества (смазки).

Это наиболее общая схема строения поверхностных слоев, которая может изменяться в зависимости от конкретных условий. В действительности строение поверхностных слоев является еще более сложным. В указанной схеме не учитывается внутренняя поверхность металлов. Наличие дефектов в строении твердых тел приводит к тому, что внутри металла существует микрокапиллярная сеть, образованная микроскопическими и субмикроскопическими дефектами. Как правило, эта система микротрещин и полостей берет начало на внешней поверхности металла и переходит в фазовые поверхности элементов структуры. Поэтому общая площадь внутренней поверхности металла зачастую может во много раз превосходить площадь его внешней поверхности. Учитывая, что ни один процесс взаимодействия поверхностей не протекает как чисто поверхностный, можно считать, что физические и физико-химические процессы при контакте твердых тел и при их трении протекают не только на самих поверхностях, но и распространяются на значительную глубину внутрь металла. При объяснении структуры граничного слоя на поверхности реального твердого тела, по мнению А.С. Ахматова, следует исходить из следующего:

1) на поверхности монокристаллических зерен образуются граничные слои правильной слоистой структуры;

2) имеет место эффект Толанского;

3) существует постоянное соотношение между направлением кристаллографических осей кристаллитов металлической поверхности и адсорбированными на них граничными слоями кристаллического строения.

Агрегатное состояние вещества в граничном слое зависит от многих факторов: температуры, давления, удельного объема, характера взаимодействия молекул с твердой поверхностью. Для вещества в граничном состоянии возможны все основные формы агрегатного состояния: твердое, жидкое, газообразное. Изменение некоторых из приведенных факторов может привести к фазовым переходам. Так, например, при повышении температуры граничные слои могут переходить из твердого в жидкое и газообразное. В связи с этим механические свойства граничных слоев должны изменяться в широких пределах: от свойств чисто вязких веществ и вязкопластических до свойств тел, обладающих истинной упругостью формы и высокой механической прочностью.

Особый интерес как для изучения граничного трения, так и для изучения кинетики разрушения в активных средах представляет толщина граничных слоев, которая, в конечном итоге зависит от природы как адсорбата, так и сорбирующих молекул. Можно считать, что структура граничного слоя, его физические и механические характеристики являются одним из важнейших факторов, оказывающих влияние на долговечность и надежность работы зубчатых передач. Действительно, трение рабочих поверхностей зубьев зубчатых передач близко к граничному. Поэтому создание на них прочных граничных слоев приведет к уменьшению трения, а соответственно и к уменьшению пластических деформаций тонких поверхностных слоев.

Механические характеристики граничных слоев зависят как от природы сорбирующих молекул, т.е. от структуры создаваемого граничного слоя, так и от количества молекулярных слоев в граничном слое. Обширные исследования, проведенные рядом авторов в области изучения поведения граничных слоев в зависимости от их толщины, показали, что при толщине граничных слоев, равной приблизительно 25-ти молекулярным слоям, они ведут себя так же, как и абсолютно чистая поверхность. То есть коэффициент трения не зависит от скорости скольжения. При увеличении толщины слоя наблюдается логарифмический закон колебаний. Таким образом, коэффициент трения зависит от скорости относительного движения, что объясняется возникновением скольжения между молекулярными слоями.

Скольжение между молекулярными слоями при толщине граничного слоя в 50 молекул становится заметным, при дальнейшем же увеличении числа молекул до 1000 становится явно выраженным.

Исходя из приведенных предпосылок, рассмотрим возможность гидравлического удара в предпеттиновых трещинах, а также существующего обоснования роли смазочных масел в процессе образования ямок выкрашивания, считая, что при определенных размерах поперечного сечения трещин различия в строении граничных слоев на свободной поверхности и поверхностях трещины отсутствуют. Естественным является предположение, что минимальная ширина трещины для рассматриваемого случая должна быть такой, чтобы электростатические поля поверхностей не перекрывались. Поэтому минимальная ширина трещины будет прежде всего определяться строением адсорбирующих молекул и для смазочных масел может изменяться в довольно широких пределах.

Предположим, что устойчивый граничный слой образован 25-ю молекулами: приняв длину одной адсорбирующей молекулы, равной 20 А, получим граничный слой толщиной 500 А, т.е. минимальная ширина трещин должна приблизительно равняться 0,01 мкм, хотя в действительности она будет гораздо большей. Так как в устойчивых граничных слоях даже в случае граничного трения сдвиговые деформации не имеют места, то становится ясным, что в таких трещинах гидравлические удары невозможны. Значит, кинетика их роста и влияние на нее смазочных масел имеют другую природу. По мере увеличения числа молекул в граничных слоях начинают проявляться и затем увеличиваться величины сдвиговых деформаций, а соответственно, сопротивление движению – уменьшаться.

При каких-то определенных размерах трещин возможно возникновение гидравлических процессов. Безусловно, на механические характеристики граничных слоев на поверхности трещин будут оказывать влияние конкретные условия работы, в частности температура. При повышении температуры следует ожидать уменьшения их толщины. Но все же возможность возникновения гидравлических явлений при микронных размерах трещин даже при самом неблагоприятном случае остается проблематичной.

Разрушение рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес происходит вблизи делительной окружности [3], т.е. на участке, где скорость относительного проскальзывания достигает максимального значения. Это указывает на существенную роль смазочных материалов в процессе питтингообразования. Применяя смазочные материалы, мы стремимся к тому, чтобы заменить металлический контакт контактом адсорбированных на твердые поверхности пленок [4]. Поэтому качество применяемых смазочных материалов должно определяться прежде всего прочностью и строением пленок на поверхностях твердых тел. Строение пограничных слоев или пленок зависит от большого количества факторов, основными из которых, на наш взгляд, являются химический состав применяемых смазочных материалов и состояние поверхности твердого тела [4].

Смазочные материалы представляют собой сложные по химическому составу растворы. Поэлементный химический состав смазочных материалов неизвестен. Для точной оценки сорбционных свойств необходимо знать компоненты, входящие в состав растворов [5]. Знание точного поэлементного состава смазочных материалов позволило бы определить вид адсорбции, а это в свою очередь дало бы возможность определить силы связи молекул с поверхностью твердых тел и оценить прочность образованной пленки, т.е. дало бы возможность прогнозировать работоспособность и более правильно подбирать смазочные материалы.

В соответствии с теорией объемного заполнения механизмы адсорбции из газовой среды и растворов идентичны. Поэтому на процесс формирования пленок и, соответственно, на физико-химические процессы в зоне контакта контактирующих тел большое влияние будут оказывать концентрация в растворе адсорбирующих молекул и количество центров адсорбции на поверхность твердых тел.

При изучении влияния смазочных материалов на процесс разрушения при контактной усталости важное значение имеет характер взаимодействия сорбирующих молекул с микропорами и, как следствие, расклинивающие усилия в микропорах.

Оценку сорбционных свойств смазочных материалов можно осуществить по относительной работе адсорбционного уровня, которая вычисляется по следующему уравнению:

$$\theta = \exp \left[- \left(\frac{A}{E} \right)^n \right],$$

где E – характеристическая энергия адсорбции; n – коэффициент, учитывающий упорядоченность молекул в адсорбированном состоянии; A – мольная работа сжатия вещества при изменении давления p до давления насыщенного пара.

В соответствии с работой [6] характеристическая энергия адсорбции принимает наименьшее значение при адсорбции непористыми адсорбентами, а коэффициент n максимальное значение принимает при адсорбции субмикропористыми адсорбентами.

Заключение. На основании изложенного можно констатировать, что процесс разрушения при контактной усталости зубчатых колес зависит как от исходного состояния (механических характеристик) материала, так и от физико-химических процессов, происходящих в зоне контактирующих тел, т.е. процессов формирования граничных слоев, и происходящих в процессе адсорбции молекул в микропоры. В соответствии с теорией объемного заполнения оценку качества смазочных материалов рекомендуется производить по величине относительного заполнения адсорбционного уровня.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адам, Н.К. Физика и химия поверхности / Н.К. Адам. – М.: ОГИЗ, 1947.
2. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1972.
3. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твердых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968.
4. Моррисон, С. Химическая физика поверхности твердых тел / С. Моррисон. – М.: Мир, 1980.
5. Михин, Н.И. Внешнее трение твердых тел / Н.И. Михин. – М.: Наука, 1977.
6. Астахов, В.А. К вопросу адсорбционного равновесия паров на микропористых адсорбентах / В.А. Астахов, М.М. Дибинин // Теоретические основы химической технологии. – 1972. – Т. III, № 2.

Поступила 25.06.2008