

Кинетика граничного смазочного слоя и изнашивание поверхности металлов при фрикционном нагружении

В.Г. Пинчук¹, С.В. КОРОТКЕВИЧ², Е.А. КОВАЛЕВ¹

Экспериментально установлен циклический характер изменения контактного сопротивления, напрямую связанного с физико-химическими процессами граничного смазочного слоя при фрикционном нагружении металлов (никель, молибден). Осцилляционная зависимость контактного сопротивления униполярно связана с интенсивностью изнашивания. В работе обсуждаются процессы взаимосвязи дислокационной структуры поверхностного слоя с физико-химическими процессами в смазочной среде.

Ключевые слова: смазочная среда, кинетика, изнашивание, нагружение.

The cyclical nature of contact resistance is directly related to the physical and chemical processes in the boundary layer of lubricating frictional loading of metals (nickel, molybdenum) is experimentally defined. Oscillatory dependence of the contact resistance is unipolarly related to the intensity of wear. This article discusses the process the relationship of the dislocation structure of the surface layer with of physical and chemical processes in lubricating media.

Keywords: lubricating media, kinetics, wear, loading.

Введение. В процессах граничного трения в присутствии смазочных сред в фрикционном контакте протекают множество физико-химических процессов, связанных с формированием и дальнейшим функционированием граничного смазочного слоя (ГСС).

Изнашивание материалов определяется толщиной ГСС, который эффективно разделяет сопряжённые поверхности и локализует за счёт своих высоких антифрикционных свойств поле сдвиговых напряжений в тонком поверхностном слое. В зависимости от класса шероховатости поверхности и состояния ГСС, флуктуации регистрируемого контактного сопротивления могут достигать значительной величины (сотни кОм). Существенный вклад ГСС в разделение сопряжённых поверхностей вносит именно его нижняя граница, так как именно она определяет толщину смазочного слоя на пятнах фактического контакта. Поэтому при проведении экспериментов регистрировали нижнюю границу напряжения и по ней определяли величину контактного сопротивления и толщину ГСС. Методика эксперимента основывалась на моделях поверхности раздела, которые могут иметь место с учётом наличия на поверхности металлов оксидных плёнок [1].

Согласно основным положений методов электрофизического зондирования, применяемых для оценки противоизносных и противозадирных свойств смазочных материалов, состояние и смазывающие свойства ГСС напрямую определяются отношением регистрируемого контактного сопротивления (R_c) к сопротивлению исходной поверхности ($R_{ок}$) [1].

Известно, что значение контактного сопротивления (R_c) определяется площадью фактического контакта и толщиной ГСС. Можно предположить, что при упрочнении поверхности, площадь на пятнах фактического контакта должна снижаться и контактное сопротивление должно увеличиваться, а при разрушении поверхности площадь фактического контакта должна увеличиваться, и, как следствие, контактное сопротивление должно снижаться. С целью подтверждения этой концепции и определения чувствительности метода электрофизического зондирования к структурным преобразованиям поверхностного слоя металлов, необходимо провести исследование кинетики контактного сопротивления и интенсивности изнашивания поверхностного слоя металла. Кроме того, является открытым вопрос об установлении влияния аккумуляции энергии в подповерхностном слое металла, связанного с дислокационным механизмом упрочнения и кинетикой ГСС.

Целью работы является установление влияния дислокационного механизма упрочнения подповерхностного слоя металла при трении на качество связи, триботехнические свойства граничного смазочного слоя и характер изнашивания.

Методика эксперимента. Испытание на трение проводили по схеме палец (Ni)-диск (Mo) с использованием машины трения АЕ-5 при нагрузке 170 кПа и линейной скорости $\approx 0,4$ м/с.

Объектом исследования являлся пластичный смазочный материал ЦИАТИМ-201. Испытания на трение проводились с периодическим внесением смазочной среды на молибденовый диск через 60 с и в режиме установившегося смазывания.

Измерение падения напряжения и соответствующий ему расчёт значений контактного сопротивления R_c осуществлялись с использованием четырёхпроводной электрической схемы [2]. Метод электрофизического зондирования позволяет оценивать нанометровую толщину ГСС по величине туннельного сопротивления непосредственно на пятнах фактического контакта [2]. Погрешность измерения значений контактного сопротивления составляла $\approx 3\%$.

Необходимо отметить, что в каждой точке измерения регистрировалось минимальное и максимальное значение контактного сопротивления. Материал пары трения никель-молибден подбирался с учётом того, что изнашивался более мягкий материал – Ni, кинетику которого мы и исследовали. Класс шероховатости поверхности Ni, изготовленного из цельного куска металла, составлял ≈ 10 –11 класс.

Методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) определялась величина изнашивания [3]. Пробы пластичного смазочного материала ЦИАТИМ-201 брались с молибденового диска с периодичностью через 600 оборотов или 480 с.

Результаты и обсуждения. Экспериментально установлена осцилляционная зависимость контактного сопротивления от времени (рисунок 1).

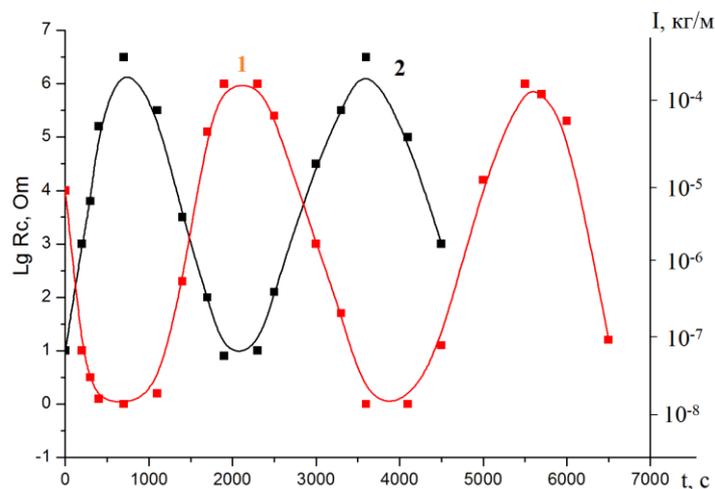


Рисунок – 1 Зависимость контактного сопротивления R_c (кривая 1) и интенсивности изнашивания I (кривая 2) от времени трения t , с.

Толщина ГСС определяется величиной контактного сопротивления и составляет ≈ 1 нм. Амплитуда значений этих параметров изменяется от 700 до 4400 Ом и составляет 3700 Ом. Верхняя граница регистрации контактного сопротивления составляет 6 МОм, что соответствует толщине сформированного ГСС $\approx 2,1$ нм [2]. Физическую сущность осцилляционного изменения контактного сопротивления необходимо рассматривать во взаимосвязи структурных изменений поверхностных слоев металлов и смазочной среды при фрикционном нагружении ввиду наличия их обоюдного влияния [4]–[6]. Воздействие смазочной среды может проявиться по двум направлениям: 1) растворением части поверхностного материала, сопровождающееся удалением части поверхностных дефектов; 2) адсорбционным облегчением пластической деформации и снижения прочности поверхностного слоя согласно эффекта П.А. Ребиндера. Влияние органических поверхностно активных веществ (ПАВ) на прочность обусловлено облегчением выхода дислокаций на поверхность ввиду понижения поверхностного натяжения [7]. В этом случае снижается скопление дислокаций в поверхностном слое и облегчается процесс транспорта их от внутренних источников, что приводит к уменьшению предела текучести и повышению пластичности материала у поверхности. Адсорбция полярных молекул ПАВ устраняет упрочняющее действие окисных пленок в поверхностном слое металла [8].

При фрикционном нагружении металла в присутствии смазочных сред на поверхности протекает множество физико-химических процессов, из которых нельзя исключить химического взаимодействия с поверхностью и образование хрупких окисных пленок. Этот процесс стимулируется дополнительно тем, что упругое поле вокруг поверхностной дислокации обладает повышенным химическим потенциалом. Необходимо отметить наиболее значимые механизмы разрушения, связанные с окислением поверхности.

1. Окисление является одним из важных факторов трещинообразования в приповерхностном слое, особенно в интрузиях активных полос скольжения [9]. В этом случае окисные пленки на поверхности интрузий являются эффективными барьерами для движущихся дислокаций, скопления которых формируют микротрещины по модели Зинера-Стро [10], соединяющиеся со слабыми местами интрузий, вероятнее всего у их вершин, где коэффициент концентрации напряжений наиболее высок и достигает нескольких десятков (~ 50). Этот параметр зависит от радиуса закругления острия интрузии и подповерхностной трещины. Согласно нашим исследованиям [11], значение скалывающих напряжений составляет $\sim 10^9$ Па, что сопоставимо с теоретической прочностью никеля, и разрушение может происходить сколом разделяющего материала.

2. Действие усталостных нагрузок при трении и неконсервативного восхождения дислокаций в соседние плоскости скольжения с возвратно-поступательным их движением при циклических нагрузках, возможно образование нарушений сплошности типа скрытых трещин у вершин интрузий [9]. Эту микротрещину авторы наблюдали при электронномикроскопических исследованиях фрикционно нагруженного никеля (рисунок 2 – стрелка).

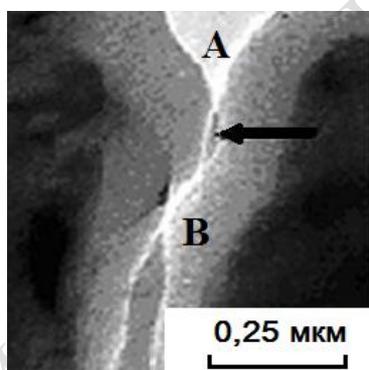


Рисунок – 2 Объединение внутренней трещины с интрузией

Такую эллипсоидальную полость, соединяющуюся затем с вершиной интрузии (А) и вершиной подповерхностной трещины (В), можно рассматривать как посредника, реализующего облегченный механизм продолжения интрузии в глубину поверхностного слоя.

3. При фрикционном нагружении поверхностей возможен третий механизм разрушения поверхностного слоя, связанный с внутренним окислением в присутствии смазочной среды. Возвратно-поступательное движение дислокаций у поверхности, обусловленное нагрузочно-скоростным фрикционным модулированием силового поля материала в силу различной высоты и разнообразия геометрических форм неровностей трущихся поверхностей, вызывает периодическое появление и исчезновение поверхностных ступенек. Это подтверждается при анализе электронномикроскопических снимков фрикционно нагруженного никеля. В поверхностном слое обнаруживается повышенная плотность мелких дислокационных петель, которые образуются в результате возвратно-поступательного перемещения винтовых дислокаций, имеющих пороги и образующие ступени скола [6]. Адсорбция поверхностно-активных составляющих смазочной среды, кислорода и водорода на ювенильной поверхности свежесформированных ступенек после механо- и термодеструкции смазки и движение этой поверхности внутрь поверхностного слоя приводят к затягиванию адсорбированных атомов и молекул по плоскости скольжения. В результате протекания этого процесса в поверхностном слое по активным полосам скольжения появляется склонность к охрупчиванию и самопроизвольному диспергированию в силу снижения свободной поверхностной энергии, образования внутренних окисных слоев и появления водородной хрупкости. Согласно [9] глущи-

на проникновения атомов кислорода внутрь активных полос скольжения, при знакопеременном нагружении составляет 100 нм, что сопоставимо с толщиной фрикционно деформируемого поверхностного слоя. Образующиеся окисные пленки являются эффективными препятствиями движущимся дислокациям в этом поверхностном слое, способствуя формированию плоских и объемных скоплений линейных дефектов, являющихся источниками трещинообразования. В результате действия перечисленных механизмов диспергирования материала в поверхностном слое, по активным полосам скольжения, формируются внутренние очаги разрыхления и расклинивания кристаллической решетки, стимулирующие склонность ее к охрупчиванию (рисунок 3).

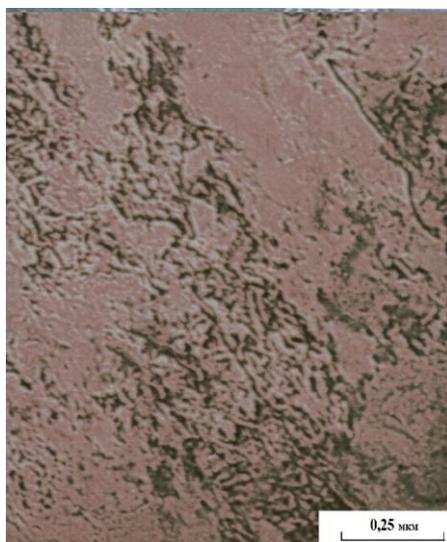


Рисунок – 3 Диспергирование и разрыхление поверхностного слоя

Конечным результатом влияния активной среды на прочностные свойства поверхностных слоев фрикционно нагруженных металлов, в плане их разрушения, сводится к снижению свободной поверхностной энергии, образованию окисных пленок и реализации водородной хрупкости.

Взаимосвязь структурных изменений в смазочной среде, прочностных и триботехнических параметров поверхностных слоев фрикционно нагруженного никеля проявляется при сопоставлении результатов исследования кинетики параметров ГСС, плотности дислокаций и интенсивности изнашивания никеля.

На рисунке 1 приведена зависимость изменения контактного сопротивления (R_c), кривая 1, и интенсивности изнашивания (I), кривая 2, от времени трения t . Анализ этих зависимостей утверждает закономерность соответствия каждому минимуму $R_c = f(t)$ циклически повторяющегося максимума интенсивности изнашивания. Наблюдаемую зависимость можно объяснить локализацией во времени процесса образования продуктов изнашивания и регуляции этого явления субструктурными и физико-химическими процессами фрикционного контактирования поверхностей. Для более полного объяснения наблюдаемой зависимости необходимо привлечь ранее полученные данные микроструктурных исследований поверхностного слоя никеля при трении. В ряде работ, в том числе [12], [13] изучены временные изменения дислокационной структуры поверхностного слоя и установлен их циклический характер. Электронномикроскопические исследования плотности дислокаций и характера их распределения в поверхностных слоях при трении подтвердили эту закономерность [12], [14]. Анализ результатов [13], [14] подтверждает закономерность соответствия минимуму плотности дислокаций циклически повторяющегося максимума интенсивности изнашивания. Эти данные свидетельствуют о локализации во времени процесса образования продуктов изнашивания и регуляции этого процесса субструктурными изменениями поверхностных слоев.

Сопоставление результатов изменения контактного сопротивления, напрямую связанных с кинетикой процессов ГСС, кинетикой дислокационной структуры и интенсивностью изнашивания, представляется возможным определить некоторые характерные закономерности их взаимовлияния.

Аккумуляция упругой энергии в подповерхностном слое никеля приводит к увеличению химического потенциала на поверхности, что обуславливает формирование прочно связанного с поверхностью граничного смазочного слоя, который эффективно разделяет сопряженные поверхности. Можно предположить, что за счёт установления ковалентной связи поверхностно-активных молекул пластичного смазочного материала ЦИАТИМ-201 с атомами поверхностного слоя никеля происходит формирование хемосорбированного слоя. В результате вышеописанного процесса сформировавшийся слой эффективно разделяет сопряженные поверхности на пятнах фактического контакта, что приводит к снижению изнашивания. Снижение контактного сопротивления свидетельствует о разрушении ГСС и появлению частиц изнашивания в контактной зоне. В результате вышеописанного процесса имеет место увеличение изнашивания ввиду разрушения тонкого поверхностного слоя составляет $\approx 0,1$ мкм.

Окислительные процессы весьма эффективно происходят в местах локализации упругих напряжений. Причиной этого процесса является повышенный химический потенциал напряженных областей, особенно в местах подповерхностных скоплений дислокаций. Важным может оказаться адсорбционный механизм, который ослабляет связи атомов в твердом теле в местах упругих напряжений, обусловленных выходом дислокаций на поверхность [15].

Кроме того, необходимо отметить влияние диффузии атомов смазочного материала вдоль дислокационной линии при выходе дислокации на поверхность. Атомы водорода, углерода и поверхностно-активных веществ (сера, фосфор, хлор и т. д.) захватываются дислокациями. В результате вышеописанного процесса формируется прочно связанный с поверхностью металла хемосорбированный слой [16]. Данный слой обладает высокой несущей способностью и антифрикционными свойствами, и эффективно разделяет сопряженные поверхности. Величина силы адгезии материалов обратно пропорциональна кубу расстояния [17]. Можно ожидать, что разрушение путём изнашивания при этом значительно снижается, что и подтверждается экспериментальными результатами.

Заключение. Таким образом, интенсивность изнашивания определяется качеством связи молекул смазочного материала с поверхностью. Доминирует фазовый переход от физической адсорбции к хемосорбции и обуславливает несущую способность и триботехнические свойства сформировавшегося слоя [1]. Установленный экспериментальный факт свидетельствует о неразрывной связи свойств подповерхностных слоёв со свойствами ГСС.

Литература

1. Пинчук, В.Г. Разработка методик для неразрушающего контроля трибосопряжения при граничном трении / В.Г. Пинчук, Е.А. Ковалёв, С.В. Короткевич // Известия ГГУ им. Ф. Скорины. – 2013. – № 6 (81). – С. 196–202.
2. Короткевич, С.В. Износостойкость металлов при граничном трении / С.В. Короткевич, В.Г. Пинчук, С.О. Бобович. – Гомель : УО ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – 237 с.
3. Пинчук, В.Г. Способ определения износа материала при трении со смазкой / В.Г. Пинчук, Р.Г. Пинчук, В.В. Харитонов, Е.М. Шишкин // А.С. № 1000845 СССР МКЛ 01 №3/56. – 1982. – Бюл. № 8.
4. Пинчук, В.Г. Исследование дислокационной структуры ферромагнетиков методом ферромагнитного резонанса / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич, С.О. Бобович, Ю.М. Плещачевский // Приборы, инструменты, материалы. – 2010. – Т. 15, № 4. – С. 108–112.
5. Короткевич, С.В. Анализ состояния поверхности раздела подшипников качения для определения режимов их работы / С.В. Короткевич // Материаловедение. – 2013. – № 8. – С. 14–24.
6. Пинчук, В.Г. Эволюция субмикронной и наноструктуры в поверхностном слое никеля при фрикционном нагружении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич, Д.Н. Гаркунов // Материаловедение. – 2013. – № 6. – С. 39–44.
7. Гарбер, Р.И. Физика прочности твердых тел / Р.И. Гарбер, Н.А. Гиндин // Успехи физических наук. – 1960. – Т. LXX, вып. 1, – С. 57–110.
8. Шоршоров, М.Х., Влияние среды и состояния поверхности на процесс пластической деформации кристаллов / М.Х. Шоршоров, В.П. Алехин // Физика и химия обраб. материалов. – 1976. – № 1. – 138 с.
9. Фуджита, Ф.Е. Разрушение твердых тел / Ф.Е. Фуджита – М. : Металлургия, 1967. – 450 с.

10. Stroh, A.N. The formation of cracks in plastic flow / A.N. Stroh // *proc. Royal Society.* – 1955. – Vol. 232 A, № 1191. – P. 404–414.
11. Пинчук, В.Г. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич // LAP Lambert Academic Publishing. – Saarbrücken : LAP, 2014. – 180 с.
12. Пинчук, В.Г. Кинетика упрочнения поверхностного слоя металла при трении / В.Г. Пинчук // *Трение и износ* – 1989. – Т. 10, № 3. – С. 401–405.
13. Пинчук, В.Г. Взаимосвязь микроструктурных изменений с кинетикой износа поверхностного слоя металла при трении / В.Г. Пинчук, Е.Г. Шидловская // *Трение и износ* – 1989. – Т. 10, № 6. – С. 965–972.
14. Пинчук, В.Г. Особенности изменения дислокационной структуры никеля при трении / В.Г. Пинчук, Б.А. Савицкий, А.С. Булатов // *Поверхность. Физика, химия, механика* – 1983. – № 9. – С. 72–75.
15. Пинчук, В.Г. Микроструктурные критерии разрушения при взаимодействии поверхности металлов и смазочной среды при трении / В.Г. Пинчук, Е.А. Ковалёв, С.В. Короткевич // *Известия ГГУ им. Ф. Скорины.* – 2014. – № 6 (87). – С. 211–215.
16. Санин, П.И. Химические аспекты граничной смазки / П.И. Санин // *Трение и износ.* – 1980. – № 1. – С. 45–57.
17. Дерягин, Б.В. Адгезия твёрдых тел / Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова, В.П. Смилга. – М. : Наука, 1973. – 277 с.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

²РУП «Гомельэнерго»

Поступила в редакцию 13.10.2015