

## Микроструктурные критерии разрушения при взаимодействии поверхности металлов и смазочной среды при трении

В.Г. Пинчук, Е.А. КОВАЛЕВ<sup>1</sup>, С.В. КОРОТКЕВИЧ<sup>2</sup>

Исследованы микроструктурные критерии разрушения поверхностных слоев металла (никель) при фрикционном нагружении поверхностей в смазочных средах. Определены физико-химические критерии окисления поверхности и формирования окисных пленок. Установлено влияние окисных пленок на прочностные свойства поверхностных слоев металлов. Рассмотрены механизмы взаимодействия окисных пленок с дислокациями поверхностного слоя. Рассмотрены аспекты внутреннего окисления и водородного охрупчивания за счет транспорта кислорода и водорода по каналам поверхностных дислокаций при механо- и термодеструкции смазки.

**Ключевые слова:** дислокации, окисные пленки, поверхностно активные вещества, коррозия под напряжением, внутреннее окисление, лепестково-послойный механизм разрушения.

The microstructural fracture criteria of the surface layers of metal (nickel) for frictional loading surfaces in lubricating media are investigated. Physicochemical criteria for surface oxidation and the formation of oxide films are defined. The influence of oxide films on the strength properties of the surface of the metal layers is stated. The mechanisms of interaction of the oxide films with dislocations of the surface layer are considered. Aspects of internal oxidation and hydrogen embrittlement due to the transport of oxygen and hydrogen via surface dislocations during mechanical and thermal degradation of grease are considered.

**Keywords:** dislocation, oxide films, surfactants, stress corrosion, internal oxidation Flap-stratified failure mechanism.

Контактирование твердых тел при трении сопровождается протеканием физических и физико-химических процессов, взаимосвязанных с напряженно-деформированным состоянием поверхностных слоев твердых тел и структурным составом смазочных сред. Большое влияние на прочностные свойства поверхностных слоев твердых тел оказывает среда фрикционного испытания. Воздействие среды может проявиться по двум направлениям:

1) растворением части поверхностного слоя материала и устранением поверхностных нарушений, что способствует повышению долговечности трущихся поверхностей;

2) адсорбционным облегчением деформации и снижением прочности согласно эффекту П.А. Ребиндера.

Механические и прочностные свойства при фрикционном нагружении металлов определяются размножением, движением и взаимодействием дислокаций между собой и другими дефектами кристаллического строения материала.

Отметим некоторые факторы, влияющие на дислокационную структуру поверхностного слоя металла:

1. Окисление поверхности посредством химического взаимодействия смазочной среды с поверхностью и образование хрупких пленок окислов.

2. Коррозионное взаимодействие среды с поверхностью или отдельными ее участками.

3. Влияние поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Рассмотрим более конкретно влияние этих факторов на микроструктуру поверхностных слоев в плане фрикционного взаимодействия поверхностей металлов и смазочной среды.

При обычном процессе фрикционного нагружения в присутствии смазочных сред, когда в фрикционном контакте протекает множество физико-химических процессов, нельзя исключить химического взаимодействия многокомпонентной смазки и поверхности металла с образованием хрупких пленок в результате ее окисления. Это структурное преобразование поверхности является одним из важных факторов разрушения посредством трещинообразования в приповерхностном слое металла, особенно в интрузиях, созданных активными полосками скольжения и механическим микрорезанием. В этом случае окисные пленки на поверхности интрузий являются эффективными барьерами для движущихся дислокаций, скопления которых, в дальнейшем, формируют трещины по модели Зимера-Стро [1] Согласно этой

модели, к зарождению трещин приводит высокая концентрация растягивающих напряжений на головной дислокации заторможенного скопления линейных дефектов. Величина этих напряжений иногда превышает предел прочности материала. Сформировавшиеся подповерхностные микротрещины соединяются со слабыми местами интрузий, вероятнее всего у их вершин, где коэффициент концентрации напряжений достигает нескольких десятков. Такой вид разрушения наблюдался нами экспериментально в никеле при фрикционном нагружении в результате электронномикроскопических исследований микроструктуры на «просвет» (рисунок 1). Согласно современным положениям, разрушение соединяющего материала между вершиной интрузии и сформировавшейся микротрещиной может быть вязким или хрупким, в зависимости от вида релаксации напряжений у вершин трещин. Это означает, что разрушение будет вязким до тех пор, пока не будут достигнуты критические значения скорости распространения и длины трещины, при которых предел текучести материала станет равным напряжению хрупкого разрушения. В этом случае реализуется критерий перехода вязкого к хрупкому разрушению и окончательное разрушение происходит с большой скоростью.

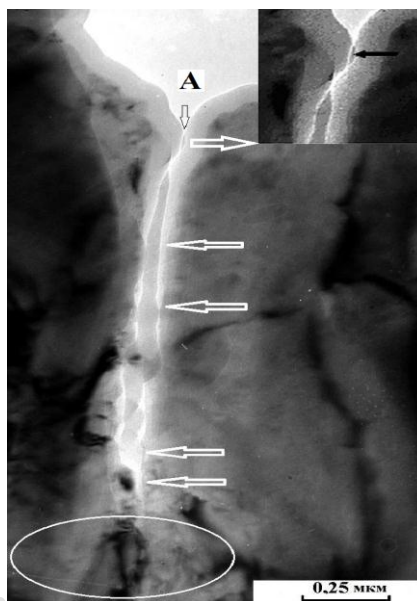


Рисунок 1 – Объединение внутренней трещины с микронадрезом поверхности никеля

Следующим критерием хрупкого разрушения металлов является протяженность зоны пластического деформирования. Если пластическая деформация осуществляется только в тонком поверхностном слое, то пластичные материалы будут разрушаться по условию Гриффитса для хрупких материалов [2]. Согласно основным положениям, нарушения сплошности материала типично хрупкое разрушение наступает после достижения достаточно высокой скорости распространения трещины. Определяющую роль в этом процессе играет связь между пределом текучести и скоростью деформации.

При фрикционном нагружении пластическая деформация поверхностных слоев протекает в условиях скоростного деформирования, при котором достигается высокая скорость распространения трещины и расширяется ассортимент деформационных искажений по степени их устойчивости. Такое положение определяет широкие возможности хрупкого разрушения материала поверхностного слоя даже при относительно малых скоростях фрикционного нагружения. В этом случае, для реализации хрупкого вида разрушения, необходима достаточная степень ограничения пластической деформации у вершины трещины для достижения высокой концентрации упругих напряжений на ее острие. В исследуемом металле (никель) высокая энергия дефекта упаковки, что является достаточным условием ограничения неконсервативного движения дислокаций при пластическом деформировании. Ограниченность перехода линейных дефектов в соседние плоскости скольжения обеспечивает высокую концентрацию упругих напряжений на острие дислокационной микротрещины [3]. Энергия этих напряжений является достаточной для интенсивного роста трещины скола материала, т. е. хрупкого разрушения.

В условиях фрикционного нагружения, действие усталостных нагрузок увеличивают вероятность неконсервативного восхождения дислокаций в соседние плоскости скольжения из за возвратно-поступательного их движения. Цикличность нагрузочных воздействий при трении обуславливается различной высотой и разнообразием геометрических форм неровностей трущихся поверхностей. При циклических нагрузках возможно образование полостей в виде скрытых трещин у вершин интрузий [4]. Такую полость, соединяющуюся затем с вершиной интрузии, можно рассматривать как продолжение интрузии. Развитие усталостной трещины авторы наблюдали экспериментально при трении никеля по молибдену в среде поверхностно-активной смазки ЦИАТИМ-201 (рисунок 1). Этот механизм разрушения наблюдался при фрикционном нагружении никеля в паре трения Ni-Mo. Испытание на трение проводилось в смазке ЦИАТИМ-201 при нагрузке 84 кПа и линейной скорости 0,5 м/с. Электронномикроскопические исследования никеля проводились на микроскопе ЭМВ-100АК методом тонких фольг на «просвет» в Харьковском техническом университете. Рисунок 1 иллюстрирует процесс объединения этих дефектов. В данном случае микротрещина (стрелки) сформировалась в вершине полосы скольжения (овал), заторможенной границей зерна. По мере продвижения и роста микротрещины происходит преобразование в виде развития клинообразного участка разрушения в ее вершине. Как видно из вставки (рисунок 1), поверхностный дефект (интрузия) также формирует клинообразную полость (позиция А) для воссоединения с образованием промежуточного объемного дефекта эллипсоидальной формы (вставка, черная стрелка). Механизм объединения напоминает процесс хрупкого разрушения разделяющего материала между подповерхностной микротрещиной и поверхностным дефектом в виде надреза (интрузии). Оценка максимального растягивающего напряжения у вершины сформированной трещины с учетом ее радиуса закругления по методике [3] показала, что значение этого параметра составляет  $\sigma = 10^9$  Па и по порядку величины сравнимо с теоретической прочностью никеля. Это значение растягивающего напряжения можно отнести к механизму, обусловленному большой степенью ограничения пластической деформации у вершины трещины, определяемой высокой энергией дефекта упаковки никеля, тормозящей неконсервативное движение дислокаций. Такое заключение не противоречит условию, что хрупкое разрушение типа скола материала реализуется при фрикционном нагружении никеля, железа. Это лежит в основе экспериментально наблюдаемого локализованного во времени лепестково-послойного характера разрушения поверхностного слоя металла при трении [5].

Дислокационная структура приповерхностных объемов оказывает влияние на прохождение процессов коррозии под напряжением. 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. Оба механизма, как коррозия под напряжением, так и адсорбция, тесно связаны, причем коррозионным процессам всегда предшествует адсорбция. Эта взаимосвязь сильно проявляется при усталостных нагрузках [6].

Особый интерес представляет адсорбция поверхностно-активных веществ на поверхности металлов, приводящая к пластифицированию последних (эффект Ребиндера). Это явление можно истолковать с точки зрения дислокационных представлений как интенсификацию зарождения и движения дислокаций с лавинным выходом их на свободную поверхность без образования окисных пленок, действие которых было рассмотрено выше. Рассмотрим иные формы этого явления. Известно, что адсорбция ПАВ на поверхности металла приводит к снижению свободной поверхностной энергии, которое в свою очередь, проявляет склонность поверхностного слоя к диспергированию и охрупчиванию [7]. Одновременно адсорбция полярных молекул сопровождается блокированием дислокаций и затруднением работы поверхностных источников, что в конечном итоге приводит к увеличению предела текучести и склонности к охрупчиванию [2]. Следовательно подвижность дислокаций определяется длительностью процессов адсорбции полярных молекул в местах их выхода на поверхность.

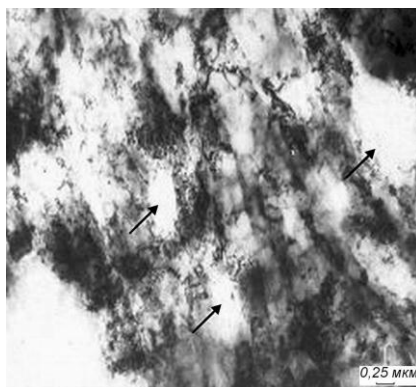


Рисунок 2 – Микроструктура диспергированного слоя никеля (поры и микрополости показаны стрелками) x 54000

Необходимо отметить наблюдаемый механизм разрушения поверхностного слоя при трении, связанный с внутренним окислением и разрыхлением металла (рисунок 2). Возвратно-поступательное движение дислокаций у поверхности вызывает периодическое появление и исчезновение поверхностных микроступенек. Адсорбция ПАВ, кислорода и водорода, образовавшегося при механо- и термодеструкции смазки на ювенильной поверхности свежесформированной микроступеньки, и движение этой поверхности внутрь поверхностного слоя приводит к затягиванию адсорбированных молекул по плоскости скольжения. В результате по активным полосам скольжения в поверхностном слое при трении появляется склонность к охрупчиванию и самопроизвольному диспергированию в силу снижения свободной поверхностной энергии, образования внутренних окисных слоев и появления водородной хрупкости. Эти окисные образования являются стабильными препятствиями для движения дислокаций в поверхностном слое и способствуют формированию плоских скоплений и последующих внутренних трещин. Влияние ПАВ на прочность металлов может объясняться с точки зрения проникновения этих веществ в зону образования зародышевой трещины у плоского скопления дислокаций. Это реализуется за счет транспорта вещества из окружающей среды посредством постоянной диффузии и вдоль линий дислокаций и, особенно, вдоль полых дислокационных ядер. При этом происходит резкое уменьшение сил поверхностного натяжения, что обеспечивает образование и развитие поверхностных и внутренних микротрещин.

Таким образом механические и прочностные характеристики металлов при фрикционном нагружении обуславливаются физико-химическими процессами в фрикционном контакте. Дислокационная структура поверхностных объемов зависит от свойств смазочных сред фрикционного контакта.

### Литература

1. Stroh, A.N. The formation of cracks in plastic flow / A.N. Stroh // *proc. Royal Society*. – 1955. – Vol. 232, A. № 1191. – P. 548–560.
2. Вествуд, А.Р. Чувствительных механических свойств к действию окружающей среды / А.Р. Вествуд. – Изд. Мир, 1972. – 176 с.
3. Хирт, Д. Теория дислокаций / Д. Хирт, Н. Лоте. – М. : Атомиздат, 1972. – 569 с.
4. Фуджита, Ф.Е. Разрушение твердых тел / Ф.Е. Фуджита – М. : Металлургия, 1972. – 456 с.
5. Пинчук, В.Г. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич // Lambert Academic Publishing. – 2014. – 180 с.
6. Лихтман, В.И. Влияние поверхностно-активной среды на процессы деформации металлов / В.И. Лихтман, П.А. Ребиндер, Г.В. Карпенко. – Изд. АН СССР, 1954. – 126 с.
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.

<sup>1</sup>Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

<sup>2</sup>РУП «Гомельэнерго»