

4. Басинюк В.Л., Мардосевич Е.И., Макаревич Г.В. Композиционные материалы на основе оксидокерамики для аэрокосмических приводных систем // В сб. «Первый белорусский космический конгресс». ОИПИ НАН Беларуси.-2003.-С.68-70.
5. Защитное покрытие из пиролитического хрома. Технология, свойства, результаты испытаний и применение // А.Д. Юрченко, В.Ф. Соколов, А.Л. Вороховов и др.-Дмитровград-10,1994.-36с.
6. Никитин М.Д. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей // Л.- Машиностроение.-1977.-156с.
7. Розенблит Г.Б. Теплопередача в дизелях // М.- Машиностроение.-1977.-216с.
8. Г.В.Макаревич, В.В.Сасковец Защитные покрытия из пиролитического карбида хрома на алюминиевых поршнях // В сб. «Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения».- Полоцкий госуниверситет УП «Технопринт».- 2001.-С.417-418.
9. Испытание поршней 245-1004021 с теплозащитным покрытием на термочувствительность. Технический акт // Минский моторный завод. Отдел главного конструктора. Техинформация ОГК ММЗ Инв. №6266/Д.- 2000.

УДК 531Ю43:620.178

КИНЕТИКА ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ УСТАЛОСТНОМ ИЗНАШИВАНИИ

Шипица Н. А., Жарин А. Л., Маркова Л. И., Фомичева И. Л.

Институт порошковой металлургии НАНБ, Минск, Беларусь
shipitsa_nik@mail.ru

Введение. Изучение изменений структуры и фазового состава материалов в поверхностном слое является одной из основных проблем современной трибологии, так как формирование таких слоев ответственно за износостойкость материалов. Обобщение и анализ кинетических зависимостей изнашивания, а также исследование механизмов поверхностного разрушения твердых тел в широком диапазоне условий трибомеханического контакта показали, что эффекты повышения износостойкости материалов обусловлены процессами трансформации структуры приповерхностных слоев на начальной стадии износа [1].

Разрушение поверхности трения и образование частиц износа при усталостном изнашивании обычно представляет многостадийный процесс: накопление дефектов кристаллической решетки материала; упрочнение поверхностного слоя; зарождение и распространение трещины; отделение частиц износа. Нами было замечено, что цикл усталостного разрушения хорошо фиксируются по периодическим изменениям работы выхода электрона трущейся поверхности [2]. Было обнаружено [3,4], что при усталостном изнашивании под поверхностью трения на достаточно большой глубине происходит отслоение материала практически под всей дорожкой трения. Наличие отслоения для однородных материалов при трении является достаточно неожиданным, аналогичные отслоения, как правило, наблюдаются при трении покрытий [5].

Настоящая работа посвящена исследованию кинетики структурных изменений на микро и мезо- уровне в приповерхностном слое материалов.

Методика исследований. Испытания проводились при трении без смазки на трехпальчиковой машине трения. Для исключения температурных эффектов скорость скольжения была выбрана достаточно малой (0,09 м/с). Исследования проводились на специально подготовленных модельных образцах из оловянистой бронзы с различным содержанием олова.

В качестве параметра, позволяющего контролировать этапы усталостного разрушения поверхностного слоя при трении скольжения, выбрана работа выхода электрона трущейся поверхности. Ранее было установлено, что в процессе усталостного изнашивания наблюдается периодические изменения работы выхода электрона от числа проходов индентора по образцу (рис. 1) [3].

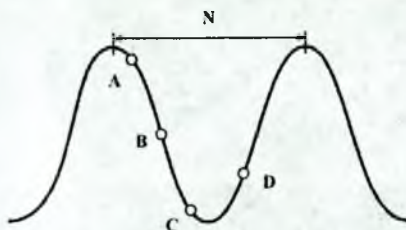
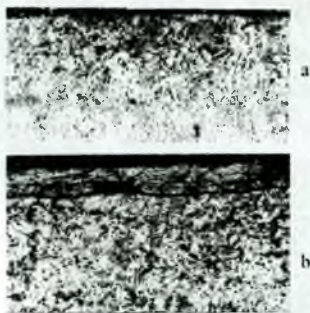


Рис. 1 Период изменения работы выхода электрона трущейся поверхности с характерными точками

За один период изменения работы выхода электрона трущейся поверхности проходит полный цикл усталостного разрушения, от накопления дефектов кристаллической решетки материала, упрочнения поверхностного слоя до разрушения трущейся поверхности [6]. Минимум работы выхода электрона трущейся поверхности по периоду наблюдается после разрушения трущейся поверхности, затем работа выхода электрона увеличивается, когда поверхность трения сглаживается, достигает максимума и уменьшается с увеличением дефектов на поверхности. Более подробно методика и техника регистрации работы выхода электрона в процессе трения приведена в работе [7].

Образцы устанавливались на машину трения и испытывались до достижения требуемой точки по периоду изменения работы выхода электрона (рис. 1). Для исследования были выбраны следующие точки: *a* — вблизи максимума, *b* и *c* — на этапе уменьшения работы выхода электрона, *d* — после разрушения трущейся поверхности. Затем образцы препарировались для дальнейших исследований. Шлифы изготавливались по стандартной методике механическим полированием с помощью алмазных паст перпендикулярно дорожке трения. Травление шлифов проводилось трехвалентным хлорным железом. Анализ микроструктуры шлифов материалов проводился методами оптической и электронной микроскопии, а также методами электронной дифрактометрии тонких фольг.



300 мкм а) - в точке а, б) - в точке с

Рис. 2 Микрофотографии шлифов материала перпендикулярных поверхности трения

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов. На рис. 2 представлены микрофотографии шлифов материала в точках *a* и *c* по периоду изменения работы выхода электрона трущейся поверхности. Вблизи минимума работы выхода электрона под поверхностью на глубине порядка 60–90 мкм (в зависимости от режимов трения) наблюдается отслоение материала практически под всей дорожкой трения (рис. 2, б). В остальных точках в оптическом микроскопе наблюдалось только незначительное дробление зерен вблизи поверхности и их вытягивание в направлении скольжения.

Исследование в растровом электронном микроскопе позволили выявить некоторые изменения в структуре материала вблизи поверхности трения (рис. 3).

В точке *a* наблюдается вытянутая вдоль дорожки трения бороздчатая структура с более высокой плотностью бороздок у поверхности трения по сравнению с объемом. Наблюдается плавный без резкой границы переход от деформированного поверхностного слоя к объемным слоям материала (рис 3, *a*)

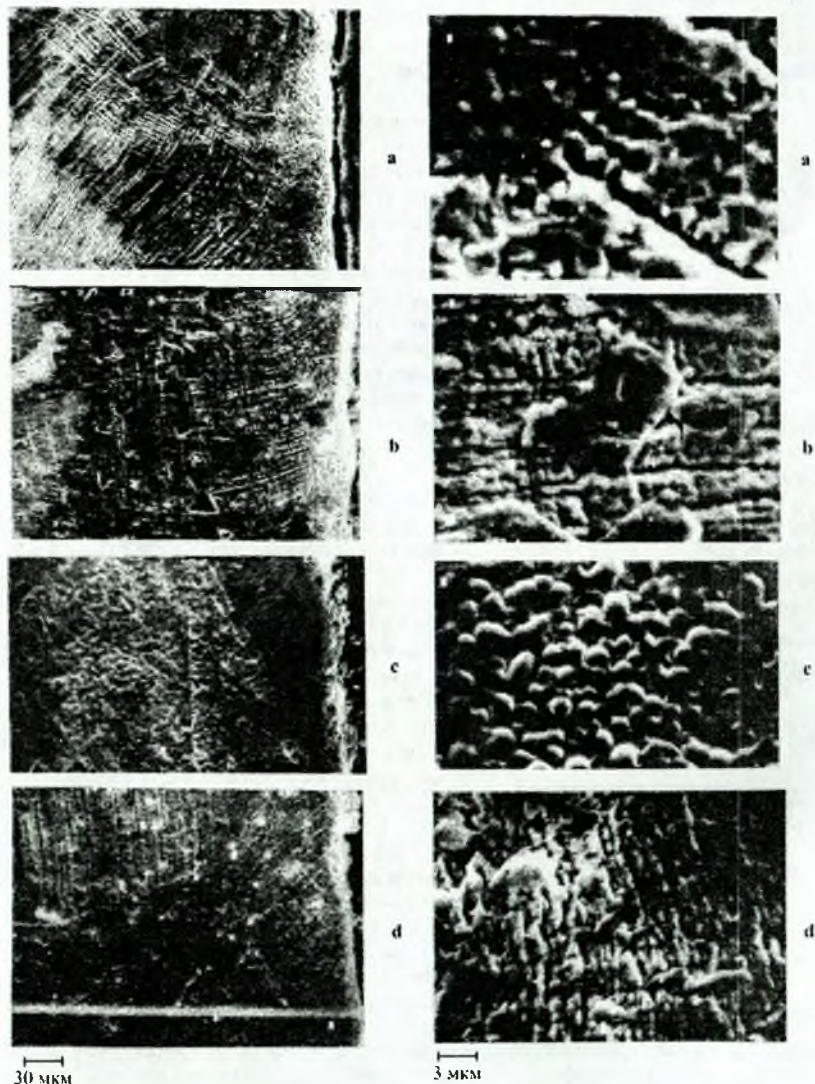


Рис. 3 Микрофотографии слоев материала перпендикулярных поверхности трения

На этапе уменьшения работы выхода электрона (рис 3, *b*) структура поверхностного слоя несколько изменяется. Около поверхности трения формируется пористый (ослабленный) слой. На глубине (5 - 20 мкм) наблюдается слой с достаточно высокой плотностью бороздок, вблизи которых видны отдельные чешуйчатые включения. При большом увеличении видно, что чешуйки связаны с основой материала только узкой перемычкой, они находятся как бы над поверхностью шлифа. Появление таких чешуйчатых включений, по-видимому, связано с эффектом экструзии, т.е. выдавливанием тонких лепестков металла под действием знакопеременных нагрузок [8]. Такие лепестки будут сильно деформированными и слабо травиться. Наблюдается нечеткая, прерывистая граница между объемом материала и поверхностным деформируемым слоем.

Наиболее интересные результаты были получены в точке, вблизи минимума работы выхода электрона (рис 3, *c*). Вдоль дорожки трения наблюдается деформированный слой материала со значительным отклонением структуры материала от объема. Толщина слоя равномерная и колеблется в диапазоне от 60 до 70 мкм. Между этим слоем материала и объемом наблюдается визуально фиксируемая на панорамных снимках граница. Подповерхностный слой имеет сложную структуру и состоит из нескольких подслоев. Можно наблюдать верхний ослабленный (пористый) слой. Толщина слоя – 2-3 мкм. Затем слой материала со слабо выявленной структурой. Ниже наблюдается слой с каплевидной структурой. Отчетливо наблюдаются элементы структуры каплевидной формы с диаметром порядка 1-1.5 мкм. Каплевидная структура постепенно переходит в бороздчатую.

В точке *d* после достижения минимума по периоду изменения работы выхода электрона структура поверхностного слоя почти не отличается от объема материала (рис.3, *d*). Наблюдается лишь незначительное дробление зерен в верхнем слое вблизи дорожки трения.

Исследование на просвечивающем электронном микроскопе позволили проследить изменение дислокационной структуры на различных этапах усталостного разрушения (рис.4).

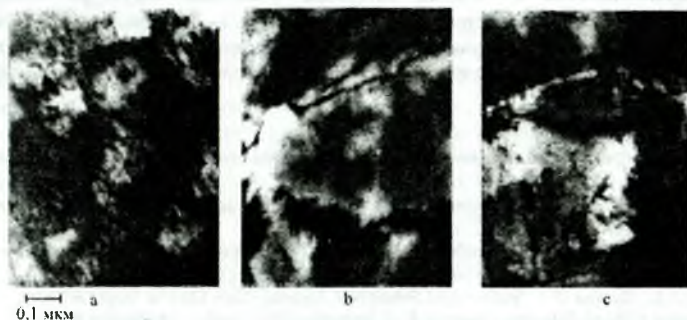


Рис. 4 Электронно - микроскопические фотографии тонких структур материала в характерных точках по периоду изменения работы выхода электрона

В точке *a* наблюдается высокая плотность дислокаций, которые достаточно равномерно распределены по объему (рис.4, *a*). На этапе уменьшения работы выхода электрона (рис. 4, *b*) наблюдаются цепочки дислокаций, сконцентрированные возле дефектов, включений или пор. В точке вблизи минимума работы выхода электрона (рис. 4, *c*) наблюдается формирование ячеистой структуры: плотное скопления дислокаций в стенках ячейки и низкая плотность дислокаций в ее объеме. Размер ячеек одного порядка с каплевидными структурами, наблюдаемыми на данном образце (рис. 3, *c*). Кро-

ме того, на образцах *в* и *с* наблюдались фрагменты с аморфной структурой (рис.5), которая, по-видимому, формируются на поверхности трения.

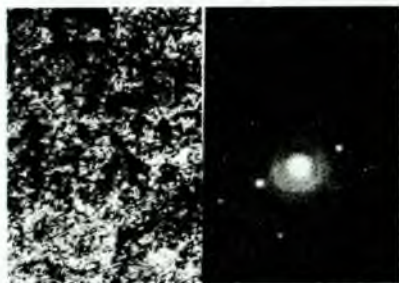


Рис. 5 Электронно-микроскопические фотографии тонких структур материала

Проведенные исследования позволили проследить кинетику структурных изменений в материале на различных масштабных уровнях (дислокации, бороздки, отслоение). Для объяснения такого поведения материалов рассмотрим изменения на трущейся поверхности и в подповерхностном слое за один этап усталостного разрушения (за один период изменений работы выхода электрона трущейся поверхности). Под действием знакопеременной нагрузки в поверхностном слое происходит образование и движение дефектов, в первую очередь, дислокаций. Постепенно под поверхностью формируется область с повышенной плотностью дислокаций. С увеличением плотности дислокаций уменьшаются междислокационные расстояния, что приводит к росту сил междислокационного взаимодействия и формированию в поверхностном слое упорядоченной дислокационной структуры. Взаимодействие дислокаций вызывает формирование специфических структур на микроуровне (бороздки, чешуйки, каплевидная структура). Увеличение плотности дислокаций выше критической, по-видимому, приводит, к фазовому переходу I рода в поверхностном слое. Наблюдаемое нами отслоение материала является границей между деформированным и не деформированным объемом материала.

Таким образом, экспериментальными исследованиями установлено, что под поверхностью трения формируется слой материала, значительно отличающийся по своим характеристикам от объема материала. Изменение структуры материала происходит в достаточно толстом поверхностном слое (~ 100 мкм). Формирование такого слоя идет синхронно как по времени, что подтверждается периодическими изменениями работы выхода электрона, так и в пространстве (отслоение материала).

Список литературы

1. Гарбар И.И. О структуре и строении поверхностных слоев сопряженных материалов трущихся пар // Трение и износ. 1990, Т. 11. № 4. С. 581 - 593.
2. Жарин Л. А., Генкин В. А. О периодичности работы выхода электрона трущейся поверхности // Трение и износ, т.2, 1981, №1, С. 118-125.
3. Жарин А.Л., Шилица Н.А., Фишбейн Е.И. Некоторые особенности усталостных процессов при трении скольжения. // Трение и износ. 1993. Т.14. № 4. С. 645 - 657. 337.
4. Zharin A.L., Shipitsa N.A. Surface And Subsurface Material State On The Stage Of Sliding Fatigue Prefracture // World Tribology Congress, 8-12 September 1997, London, Mechanical Engineering Publication Limited, p. 730
5. Engel P.A., Hsue E. Y., Bayer R.G. Hardnes, friction and wear of multiplicated electrical contacts. Wear, v.162-164, 1993, pp.538-551.
6. Жарин А.Л., Шилица Н.А., Сарока Д.И. Определение характеристик усталостного разрушения материалов при трении скольжения. Часть 2. Периодические изменения работы выхода электрона трущейся поверхности как параметр усталостного разрушения при трении // Трение и износ. 2001. Т.22. № 5. С. 535 - 539
7. Жарин А.Л. Метод непрерывного контроля процессов трения // Трение и износ, 1993. т.14. № 3. С. 570-582
8. Коцаньда С. Усталостное разрушение металлов. М. Металлургия 1976, с 455