

УДК 621.891:669.018.44

*Л. И. Ивченко, д-р техн. наук, проф.,  
В. В. Цыганов, канд. техн. наук, доц.*

## **ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ СЛОЖНОМ ЗНАКОПЕРЕМЕННОМ НАГРУЖЕНИИ**

Запорожский национальный технический университет,  
[ivschenko@zntu.edu.ua](mailto:ivschenko@zntu.edu.ua)

*Рассмотрены модели разрушения металлов при трении в условиях знакопеременного сложного нагружения. Представлена методика и установка для проведения ускоренных исследований материалов на износостойкость с различными условиями нагружения.*

**Общие положения и цель работы.** Износостойкость деталей механических систем связана с комплексом различных факторов. Большая часть деталей трибосопряжений машин и механизмов работают в условиях сложного нагружения в связи с функциональными взаимными перемещениями в различных направлениях, наличием вибраций или их комбинациями.

Как известно, в результате диссипативных процессов при трении, работа внешних сил сопровождается поглощением энергии поверхностным слоем материала и образованием теплоты. Особенности и специфичность механизма пластической деформации при трении в условиях сложного нагружения до настоящего времени не позволили разработать физические основы и раскрыть закономерности поверхностного разрушения. Исследование структуры и свойств поверхностей деталей трибосопряжений показывают, насколько сложны и разнообразны поверхностные явления. При этом невозможно перенести достижения в области основных прикладных наук на сопредельные области, к которым относятся процессы контактного взаимодействия. Исследования процессов в зоне контактного взаимодействия твердых тел обычно сопровождаются трудностями, связанными с неоднозначным влиянием поверхностно-активной среды, типом кристаллической структуры, распределением плотности дислокаций, различными возможностями методов исследований.

**Цель данной работы** – определение закономерностей изменения износостойкости трибосопряжений при трении в условиях сложного знакопеременного нагружения.

**Постановка проблемы.** Сочетая в едином подходе критерии физики разрушения и механику напряженно-деформированного состояния, возникающих в процессе трения при сложном нагружении, можно основываться на представлениях о том, что материал пары трения является сложной самоорганизующейся системой. В местах непосредственного контакта происходит направленная деформация – текстурирование поверхностных объемов металла, что связано с изменением формы зерен и их кристаллографической ориентации под действием внешней нагрузки. Происходит приспособляемость металла зоны взаимодействия тел к условиям нагружения. Тип и характеристики текстуры зависят от вида деформации, температуры и структурно-фазового состояния металла, в частности, от типа его решетки.

Известно, что текстура является результатом вытягивания металлических зерен поверхностного слоя в направлении скольжения. При этом оси главных напряжений ориентируются вдоль направления трения, что обуславливает анизотропию механических свойств материала поверхностного слоя. Данная анизотропия является вторичной, т. е. результатом пластической деформации материала в зоне фактических пятен касания. Прочность анизотропных материалов существенно зависит от направления приложения нагрузки, однако в трибологических исследованиях этот факт часто игнорируется [1].

Существующие модели разрушения металлов при трении основаны на предположении, что в зарождении трещины участвуют дислокации, которые создают скопления с высокими локальными напряжениями, релаксирующими путем зарождения микротрещины. Границы зерен препятствуют скольжению дислокаций и «передаче» деформации из зерна в зерно. Измельчение зерна является тем способом управления структурой, который приводит обычно к одновременному повышению прочности и вязкости металла, т. е. к увеличению сопротивления хрупкому разрушению.

Известны три стадии циклического деформирования металла, каждая из которых характеризуется определенными особенностями и структурными изменениями. На первой стадии происходит дробление субструктуры и накопление дислокаций, на второй стадии развиваются нарушения сплошности (деструкция материала) и на третьей – локальное развитие процесса разрушения образца от поверхности вглубь по сечению [2].

При этом следует иметь в виду, что знакопеременное деформирование сопровождается возвратно-поступательным движением дислокаций. Поэтому наибольший интерес представляет первая стадия деформирования металла как определяющая физико-механические свойства поверхностного слоя и механизм разрушения материала при трении. Сложный характер нагружения приводит к изменению интенсивности процесса возвратно-поступательного движения дислокаций и связанного с ним развития микроповреждений металла, которое определяется структурным состоянием материала. Именно условия контактного взаимодействия при трении приводят к различному деформированию поверхностного слоя металла и формированию его структурного состояния с определенной свободной энергией, физической и химической активностью.

Можно предположить, что возвратно-поступательные движения во взаимно перпендикулярных направлениях приводит к формированию в поверхностном слое ячеистой структуры с не столь вытянутыми и более крупными ячейками, а при равной амплитуде и частоте колебаний – к отсутствию вытяжки фрагментов. Это приводит к повышению интенсивности изнашивания. Кроме того, для облегчения процесса перемещения дислокаций и образования частиц износа поверхностный слой должен быть и достаточно равнопрочным.

Добавление ударной нагрузки при трении повышает многоцикловую усталость в результате пластической деформации и ускоряет отделение частиц. Упорядоченная последовательность скоростей износа при переходе от трения к ударным нагрузкам полностью нарушается. Учитывая волновое воздействие ударного нагружения и наличие больших контактных нагрузок при ударе из-за малого времени воздействия, нельзя ожидать аналогии между закономерностями изнашивания при ударе и скольжении. А поскольку, в соударяющихся деталях в промежутках между ударами сохраняется до 30% первоначальной энергии в виде сложного спектра и достаточно высокой амплитуды [3], то материал находится в постоянном напряжении, что не может не сказаться на сопротивлении изнашиванию.

При работе в условиях циклического нагружения в поверхностном слое деталей происходят интенсивные структурные изменения, обусловленные деформационным упрочнением с последующим разупрочнением. При этом подповерхностные участки, структура кото-

рых менее деформирована, становясь поверхностью трения, испытывают пластическую деформацию. В процессе установившегося изнашивания упругопластическая деформация реализуется в виде преимущественно упругого взаимодействия сформировавшихся участков поверхностного слоя и пластической деформации вновь образующихся участков поверхности. Соотношение количеств этих участков для каждого материала зависит от режимов трения. При увеличении ударной нагрузки возрастает доля участков, претерпевающих пластическую деформацию, что вызывает увеличение интенсивности изнашивания.

Таким образом, можно предположить, что сложное трехмерное нагружение (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях), создает условия для формирования фрагментов поверхностного слоя с относительно легким прохождением дислокаций через данные кристаллиты к их границам. В результате образуется поверхностный слой с более равномерной текстурой, что сопровождается повышенным износом. Изменение характера нагружения приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопрежения.

**Материал и результаты исследований.** Для проверки указанных положений необходимо проведение комплекса исследований, что в условиях работы трибосопрежений узлов реальных конструкций сопряжено с большими трудозатратами. Существующие методы определения интенсивности изнашивания сдерживают выявление всего многообразия процессов контактных взаимодействий и поверхностного разрушения. Для построения общей закономерности интенсивности изнашивания от скорости относительного скольжения и удельной нагрузки только для одного материала и одной рабочей среды требуется около 300 часов работы. При измерении интенсивности изнашивания традиционными методами наблюдается большой разброс данных (50%) [4].

В связи с этим были разработаны методики и ряд установок для проведения ускоренных исследований материалов на износостойкость с различными условиями нагружения (однонаправленное скольжение, удар с проскальзыванием, удар с проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях) [5].

Однако наиболее приемлемой для проведения модельных испытаний износостойкости в условиях приближенных к натурным

условиям эксплуатации большинства трибосопряжений является установка представленная на рис. 1. Установка позволяет регулировать параметры нагружения по трем направлениям и определять износ образцов на установке без их снятия. Кроме того, в случае необходимости выделения процессов в «чистом виде», есть возможность проводить испытания с различным нагружением образцов с разрывом и без разрыва контакта, т.е. только с колебаниями и проскальзыванием в двух взаимно перпендикулярных направлениях. При этом специальный узел при необходимости позволяет обеспечить контакт между образцами только при движении в одном направлении, а при движении в противоположном направлении контакт разрывается. Если колебательное движение, которое обеспечивает проскальзывание в поперечном направлении, происходит в той же фазе, что и движение в продольном направлении, то в поперечном направлении будет происходить не реверсивное, а однонаправленное проскальзывание [6].

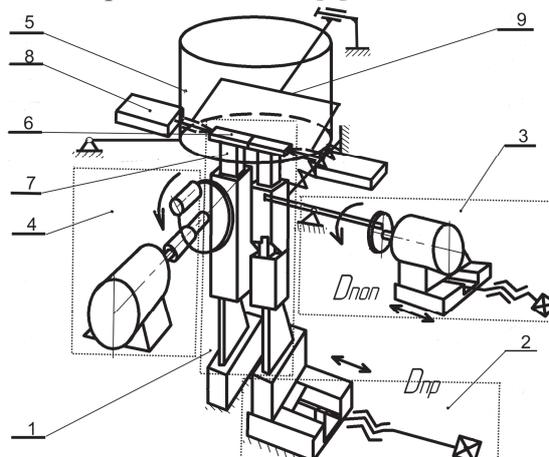


Рис. 1. Схема установки для исследования износа образцов при сложном трехмерном нагружении

Устройство состоит из узла крепления образцов 1, узла задания нормального статического нагружения 2, узла задания продольного перемещения и энергии удара 4, узла задания поперечного перемещения 3, узла задания температуры 5 с шарнирным креплением и узла контроля износа образцов 6, которые закреплены на

державках 7. Узлы 2, 3, 4 обеспечивают трехмерность нагружения образцов – удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Узел контроля износа образцов имеет два контактных датчика 8, которые установлены на вилке 9.

После установленного (необходимого) количества циклов нагружения в контакт с образцами вводятся одновременно два датчика и определяется линейный износ образцов непосредственно измерением изменения линейных размеров пары образцов. Для этого необходима остановка устройства и предварительное отведение узла заданной температуры 5 от образцов с помощью шарнирного соединения.

Как показали результаты предварительно проведенных исследований, сложный характер нагружения приводит к напряженному состоянию поверхностных слоев материалов трибосопряжения, что сопровождается повышенным износом. Изменение характера нагружения приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосопряжения. Наличие поперечных проскальзываний при трении существенно повышает интенсивность изнашивания образцов в сравнении с износом при двухмерном нагружении (удар и продольное проскальзывание). Сообщение образцам поперечных проскальзываний с амплитудой до 0,08 мм приводит к увеличению объемной интенсивности изнашивания для сплава ВТ 20 в 1,38 раз, 60С2А – 1,7 раз, ХТН-61 – 2,6 раз по сравнению с объемной интенсивностью изнашивания при двухмерном нагружении.

Оценку физико-механических свойств поверхностного слоя производили путем анализа прочностных и деформационных характеристик трибоспектральным методом и методом акустической эмиссии изменением работы выхода свободных электронов и фрактограмм поверхностей. Установлено, что повышенный износ происходит у деталей с однородным равнопрочным поверхностным слоем. Увеличение поперечных проскальзываний при трении с трехмерным нагружением способствует образованию более однородного поверхностного слоя, снижению его прочности, получению более равномерной микрогеометрии поверхности, которая сопровождается снижением величины и разброса работы выхода электрона по поверхности. Степень этих изменений существенно зависит от химико-физических свойств материалов и условий трения [7].

В качестве примера на рис. 2 представлены трибограммы тангенциальной составляющей силы трения при сканировании образцов из стали 60С2А после испытаний с двухмерным (без поперечных проскальзываний) и трехмерным нагружением. Существенное изменение амплитуды колебаний тангенциальной составляющей силы трения при сканировании образцов наглядно отображает отличие в прочности фрагментов поверхностного слоя.

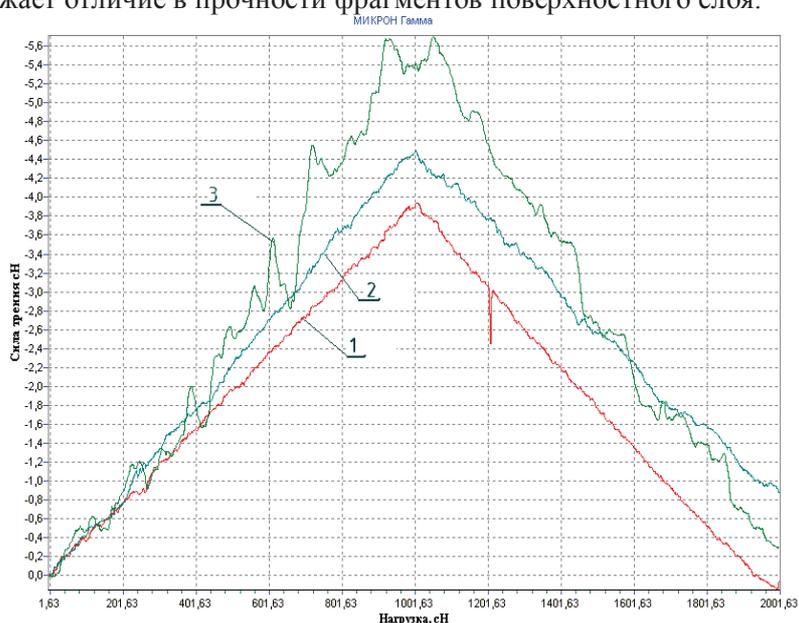


Рис. 2. Трибограммы тангенциальной составляющей силы трения при сканировании образцов из стали 60С2А после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний (частота поперечных проскальзываний 30 Гц; частота продольных проскальзываний 66 Гц; амплитуда продольных проскальзываний 0,1 мм; нормальная погрузка 20 Н, время испытаний до 4 часов): 1 – амплитуда поперечных проскальзываний 0,08 мм; 2 – амплитуда поперечных проскальзываний 0,06 мм; 3 – амплитуда поперечных проскальзываний 0 мм

Наблюдаемое при испытаниях увеличение износа при сложном нагружении с наличием ударной нагрузки является, видимо, результатом комплексного воздействия удара на состояние поверхностного слоя. Во-первых ударная нагрузка приводит к увеличению дислокаций в поверхностном слое, а во-вторых приводит к

возникновению пульсирующей, циклически изменяющейся силы трения в процессе скольжения при сложном нагружении.

Согласно волновой теории деформации в деформируемом теле возникает целый спектр волн пластической деформации различной длины, которые определяют иерархию структурных уровней деформации. Простейшим видом объемных волн являются плоские волны, которые состоят из продольных (расширения – сжатия) и поперечных (сдвиговых). Примером автоволновой природы пластической деформации является эффект Портевина-Ле-Шателье (прерывистое течение).

Специфика ударных волн заключается в том, что в ее фронте реализуются более высокие сдвиговые напряжения, чем при обработке материала относительно плавной волной (не ударной). Структура и профиль ударной волны напрямую связаны с вопросом ее затухания. После выхода на свободную поверхность ударная волна отражается волной разряжения (разгрузки), которая, в частности, может привести к отколу. Затухание объясняется взаимодействием волны сжатия с волной разряжения. Пластическое деформирование приводит к изменению величины внутренней энергии материала за счет изменения его структуры. Основная диссипация за счет образования дефектов происходит на фронте ударной волны. Фронт волны плотности подвижных дислокаций растет четко коррелируя с волнами нагрузки и разгрузки [8].

Таким образом, наличие ударной нагрузки при трении с трехмерным нагружением приводит к изменению волновой картины деформируемого тела. Взаимодействуя с волнами деформаций от продольного и поперечного скольжения, ударная волна способствует изменению напряжений и структурного состояния поверхностного слоя. Фронт волны, доходя до любой акустической границы (поверхности, межзеренной границы, скопления дефектов), частично отражается от нее. Отражения между границами фрагментов и дефектами решетки, приводя к рассеянию волновой энергии в зернах и на дефектах, генерируют спектр затухающих колебаний. Можно предположить, что наложение перечисленных волн, а, следовательно, и волн плотности дислокаций, приводит к получению равнопрочного поверхностного слоя образцов за счет более равномерного распределения дислокаций.

Из вышеизложенного следует, что особенностями износа три-

босопряжений при повышении сложности нагружения (наличии дополнительно к проскальзыванию ударной нагрузки или проскальзывания во взаимно перпендикулярных направлениях) является:

- увеличение интенсивности изнашивания;
- повышение однородности поверхностного слоя (равнопрочности и крупнофрагментности);
- уменьшение величины и повышение равномерности равновесной шероховатости поверхности;
- снижение величины и разброса работы выхода электрона по поверхности.

**Выводы.** Для обеспечения повышенной износостойкости трибосопряжений при сложном нагружении необходимо использование комплексного подхода к определению взаимосвязи триботехнических и структурных свойств контактирующих материалов при различных видах нагружения. При этом пластически-деструкционный характер поведения металла при трении должен рассматриваться как физико-химический, т.е. процесс, который сопровождается комплексом структурных, физических и физико-химических изменений поверхностного слоя деформируемого металла.

Исследование закономерностей трансформации структуры и особенностей структурного состояния, деформированных при трении поверхностных слоев металла, позволяет установить связь между структурой и свойствами, в том числе износостойкостью материала. Изучение структуры, формирующейся при конкретных условиях трения, открывает возможности выбора материалов и оптимальных режимов их эксплуатации, создает предпосылки для разработки новых износостойких материалов и покрытий. Определение закономерностей и разработка условий формирования износостойкого поверхностного слоя деталей трибосопряжений возможно на основе анализа величины износа и состояния поверхности с учетом реального вида нагружения.

#### Список литературы

1. *Арышенский Ю.М.* Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю.М. Арышенский, Ф.В. Гречников. – М.: Металлургия, 1990. – 304 с.
2. *Рыбакова Л.М.* Структура и износостойкость металла /Л.М.Рыбакова, Л.И. Куксенова. – М.: Машиностроение, 1982. – 212с.

3. Хоукс Н. Поведение волн деформации в штангах станков ударного бурения /Н. Хоукс, Т.К. Чакраварти // Разрушение и механика горных пород. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 169с.

4. Костецкий Б.И. Исследование общих закономерностей поверхностного разрушения с помощью метода контактного электросопротивления / Б.И.Костецкий, Б.В.Гупка, А.Р.Мшенеш, А.И.Гупка //Проблемы трения и изнашивания. – 1987. – Вып. № 31. – С. 19–22.

5. Ивченко Л.И. Ускоренные испытания сложнонагруженных деталей трибосопряжений /Л.И.Ивченко, В.В.Цыганов, В.И.Черный //Вісник двигунобудування. – 2009. – № 1. – С. 150–154.

6. Пат. 53587 Україна, МПК G01N3/56. Пристрій для дослідження тертя / Івченко Л.Й., Циганов В.В.; заявник та патентовласник Запорізький нац.-техн. унів. – № и201004585; заявл. 19.04.2010; опубл. 11.10.2010, Бюл.№19. – 2 с.

7. Ивченко Л.И. Особенности изнашивания трибосопряжений в условиях трехмерного нагружения /Л.И. Ивченко, В.В.Цыганов, И.М.Закиев // Трение и износ. – 2011. – Том 32, № 1. –С. 500–509.

8. Артемьев В.А. Формирование, затухание и взаимодействие ударного импульса конечной протяженности со свободной поверхностью упругопластического тела /В.А.Артемьев, В.А.Баскаков, Е.В.Палканов, А.Е.Чернов //Вестник ВГУ, серия: Физика, математика. 2004. – № 2. – С. 103–116.

*Івченко Л.Й., Циганов В.В. Інтерпретація результатів зношування при складному знакозмінному навантаженні // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С.45–54.*

Розглянуті моделі руйнування металів при терті в умовах знакозмінного складного навантаження. Представлена методика і установка для проведення прискорених досліджень матеріалів на зносостійкість з різними умовами навантаження.

Рис. 2, Список літ.: 8 найм.

*Ivschenko L.I., Tsyganov V.V. Interpretation of results of wear is at the difficult loading of variable sign*

The models of destruction of metals are considered at a friction in the conditions of variable sign difficult ladening. A method and fluidizer leadthrough of speed-up researches of materials is presented on wearproofness with the different terms of ladening.

**Ключевые слова:** трение, износостойкость, сложное нагружение, поверхностный слой, модельные испытания.

Стаття надійшла до редакції 01.06.2011