

УДК 621.891:669.018.44

Д-р техн. наук Л. И. Ивченко, канд. техн. наук В. В. Цыганов*Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье*

СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ МАТЕРИАЛОВ СЛОЖНОНАГРУЖЕННЫХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрены вопросы структурной приспособляемости поверхностного слоя деталей трибосопряжений при трении в условиях многокомпонентного динамического нагружения. Показана связь трансформации структуры, особенностей структурного состояния деформированных при трении поверхностных слоев металла и износостойкости.

Ключевые слова: износ, износостойкость, поверхностный слой, структурное состояние.

Введение и проблематика вопроса

В современной трибологии все шире рассматриваются процессы самоорганизации материала в поверхностных слоях при трении на основе синергических принципов. В соответствии с этими принципами в результате контактного взаимодействия формируются особые диссипативные структуры, способные преобразовывать внешнюю механическую энергию во внутреннюю энергию деформационных процессов, что сопровождается уменьшением вероятности разрушения и дает возможность повысить износостойкость трибосопряжений.

При структурной приспособляемости, как отмечал Б. И. Костецкий [1], вся работа диссипации превращается в тепло и термическая нагруженность поверхности существенно зависит от диссипативной способности основного материала. Этот фактор вместе с прочностью вторичных структур при контактном взаимодействии определяет износостойкость материала. В процессе структурной приспособляемости материалов происходит перестройка структуры поверхностного слоя в энергетически выгодную для данных условий нагружения [2].

Однако отмеченная в работах различных авторов значительная структурная перестройка поверхностных слоев материалов трибосопряжений труднодоступна и не позволяет детализировать конкретные механизмы обеспечения повышенной износостойкости. Вызвано это, прежде всего условиями проведения исследований, которые часто не соответствуют реальным условиям эксплуатации трибоузлов, поскольку большая часть деталей трибосопряжений работает в условиях сложного динамического нагружения, связанного с вибрациями, действующими в разных направлениях, что влияет на нестабильные синергические процессы.

Методики исследований

Для раскрытия механизма формирования оптимального износостойкого поверхностного слоя

деталей трибосопряжений, которые эксплуатируются при многокомпонентном динамическом нагружении, разработаны соответствующие методики и установки [3, 4]. Оценивали изменение интенсивности изнашивания при различных условиях двухкомпонентного нагружения – (удар с последующим продольным проскальзыванием) и трехкомпонентного – (удар и проскальзывание в двух взаимно перпендикулярных направлениях) на образцах различных сталей и сплавов: ВТ20, 40Х, ХТН-61, 60С2А по методике, представленной в работе [5]. Условия проведения испытаний: амплитуда поперечных проскальзываний от 0 до 0,2 мм; амплитуда продольных проскальзываний 0,1 мм; частота поперечных проскальзываний 30 Гц; частота продольных проскальзываний 66 Гц; нормальная нагрузка 20 Н, время испытаний от 2 до 4 часов.

Результаты исследований и их обсуждение

Наличие поперечных проскальзываний при трении с трехкомпонентным нагружением, как представлено на рисунке 1, существенно повышает интенсивность изнашивания образцов в сравнении с износом при двухкомпонентном нагружении ($A_{non} = 0$) для всех рассмотренных материалов, что является следствием изменения структурного состояния поверхностного слоя. Повышенному износу подвержены образцы с однородным по прочностным свойствам поверхностным слоем. Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний при трении с трехкомпонентным нагружением способствует образованию более однородного поверхностного слоя, уменьшению его прочности, достижению более равномерного рельефа поверхности, что коррелирует со снижением значений работы выхода электрона и их разброса по поверхности [6]. Однако величина корреляции между износостойкостью и степенью однородности поверхностного слоя существенно отличается и зависит не только от динамики нагружения, но и от свойств матери-

ла, а также температуры окружающей среды, что значительно усложняет управление синергетическими процессами.

При этом зависимость объемной интенсивности изнашивания от амплитуды поперечных проскальзываний является нелинейной и ее характер для различных металлов существенно отличается. Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний более определенного предельного значения не приводит к росту объемной интенсивности изнашивания. Для сплава ХТН-61 эта величина составляет 0,1 мм, для стали 60С2А – 0,06 мм, для сплава ВТ20 и стали 40Х – около 0,3 мм. Причем, как следует из представленных результатов, чем более износостойким в условиях опытов является материал, тем меньше величина предельной амплитуды поперечных проскальзываний – материал быстрее «приспосабливается» к изменению условий сложного трехкомпонентного нагружения связанных с наличием поперечных проскальзываний.

Проверка полученных положений потребовала исследований физико-механических свойств поверхностного слоя изношенных образцов с определением закономерностей поверхностного разрушения анализируемых материалов, которые определяли методами непрерывного вдавливания и сканирования индентором на специальном приборе «Микрон-гамма». Метод непрерывного вдавливания индентора основан на автоматической регистрации глубины внедрения в зависимости от приложенной нагрузки на индентор. Метод сканирования базируется на непрерывной регистрации сопротивления движению индентора по поверхности (тангенциальная составляющая силы трения индентора) в зависимости от приложенной нагрузки. Определение статистических связей между сопротивлениями локальных микрообъемов материала контактному деформированию

позволяет произвести комплексную оценку состояния поверхностного слоя на трассе сканирования и, в частности, позволяет оценивать среднюю прочность на трассе сканирования, оценивать разброс и неоднородность прочностных свойств, моделировать элементарные акты процессов трения и износа [7]. Режимы сканирования: величина нагрузки на индентор – 0,1 Н; скорость нагружения – 0,01 Н/с; скорость сканирования – 40 мкм/с.

Трибограммы тангенциальной составляющей силы трения при сканировании образцов из основных исследованных материалов после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний представлены на рисунках 2–4. Как следует из полученных результатов, трение с трехкомпонентным нагружением при амплитудах поперечных проскальзываний, близких к предельным, приводит к перестройке структуры поверхностного слоя в энергетически выгодную для данных условий нагружения и снижению интенсивности изнашивания.

Наиболее наглядно это можно наблюдать на образцах стали 60С2А. Учитывая сравнительно высокую износостойкость этой стали, амплитуды поперечных проскальзываний оказывают меньшее влияние на величину интенсивности изнашивания. Применяемые при испытаниях амплитуды поперечных проскальзываний оказались близки к предельным, что сопровождается существенным изменением структурного состояния поверхностного слоя образцов. При трении с $A_{non} = 0,06$ мм и $A_{no n} = 0,08$ мм образовался менее прочный, чем при двухкомпонентном нагружении с $A_{non} = 0$, однородный равнопрочный поверхностный слой. На рисунке 2 соответствующие трибограммы указывают на меньшую величину и разброс тангенциальной составляющей силы трения.

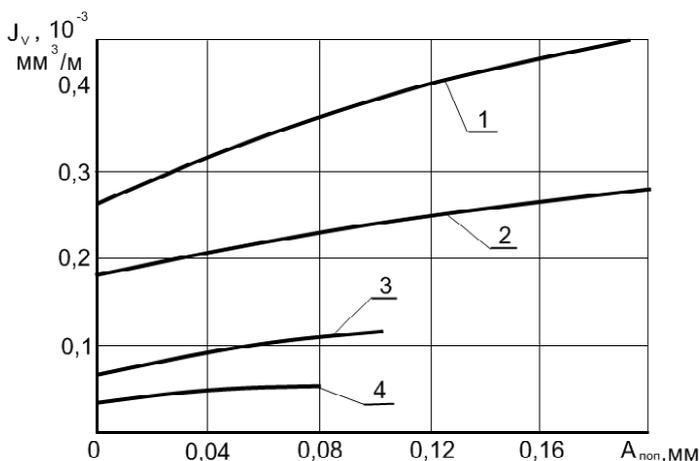


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания от амплитуды поперечных проскальзываний при износе образцов различных материалов: 1 – сплав ВТ 20; 2 – сталь 40Х, 3 – сплав ХТН-61; 4 – сталь 60С2А

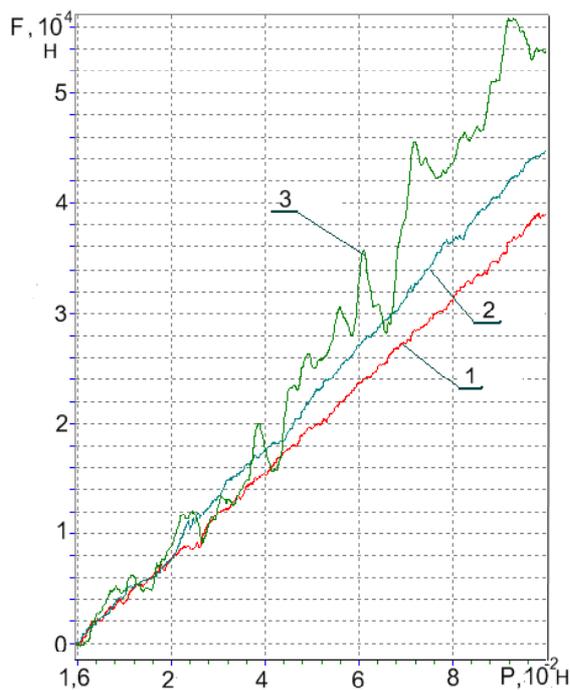


Рис. 2. Изменение тангенциальной составляющей силы трения F при сканировании образцов из стали 60С2А после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний в зависимости от нагрузки на индентор: 1 – амплитуда поперечных проскальзываний 0,08 мм; 2 – амплитуда поперечных проскальзываний 0,06 мм; 3 – амплитуда поперечных проскальзываний 0 мм

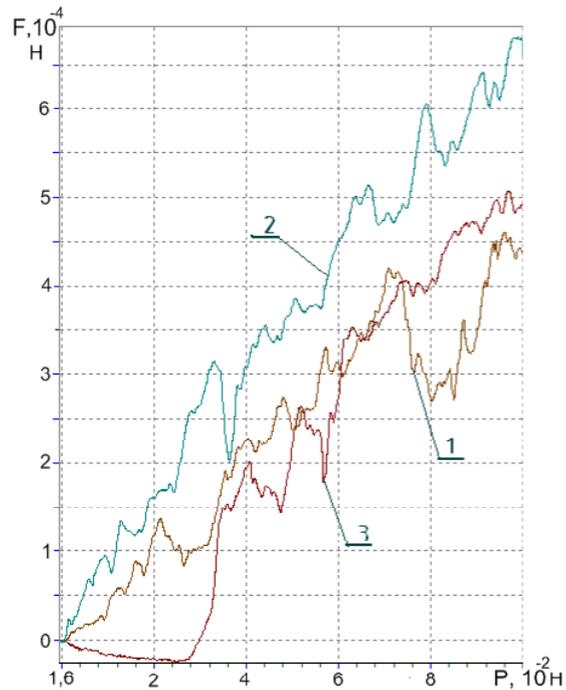


Рис. 4. Изменение тангенциальной составляющей силы трения F при сканировании образцов из сплава ВТ20 после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний в зависимости от нагрузки на индентор: 1 – амплитуда поперечных проскальзываний 0,20 мм; 2 – амплитуда поперечных проскальзываний 0,17 мм; 3 – амплитуда поперечных проскальзываний 0,06 мм

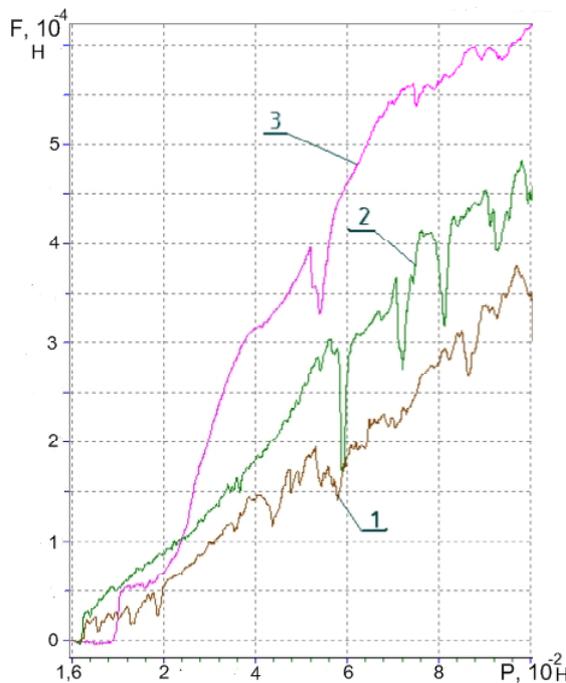


Рис. 3. Изменение тангенциальной составляющей силы трения F при сканировании образцов из сплава ХТН-61 после испытаний с различными амплитудами поперечных проскальзываний в зависимости от нагрузки на индентор: 1 – амплитуда поперечных проскальзываний 0,05 мм; 2 – амплитуда поперечных проскальзываний 0,01 мм; 3 – амплитуда поперечных проскальзываний 0 мм

Для других исследованных материалов эти изменения менее существенны, т. к. применяемые при испытаниях амплитуды поперечных проскальзываний далеки от предельных. Однако снижение дисперсии тангенциальной составляющей силы трения при сканировании (рис. 5) указывает на отмеченную зависимость, причем в большей степени она проявляется на более износостойком материале.

При этом необходимо учитывать, что на структурное состояние поверхностного слоя и механизм изнашивания при сложном динамическом нагружении титанового сплава ВТ20 может оказывать существенное влияние наличие на поверхности наноструктурных пленок. Показано [8], что при изнашивании данного материала на воздухе, при комнатной температуре на поверхности трения образуются подобные пленки, которые выполняют роль твердой смазки. В состав пленки входят оксиды, гидроксиды, нитриды, гидриды хрома, титана. В частности, влияние пленок на свойства поверхностного слоя сплава ВТ20 проявляется в начальный период внедрения индентора при минимальной амплитуде поперечных проскальзываний (0,06 мм). Как следует из трибограммы 3 (рис. 4), происходит падение тангенциальной составляющей силы трения. Исходя из

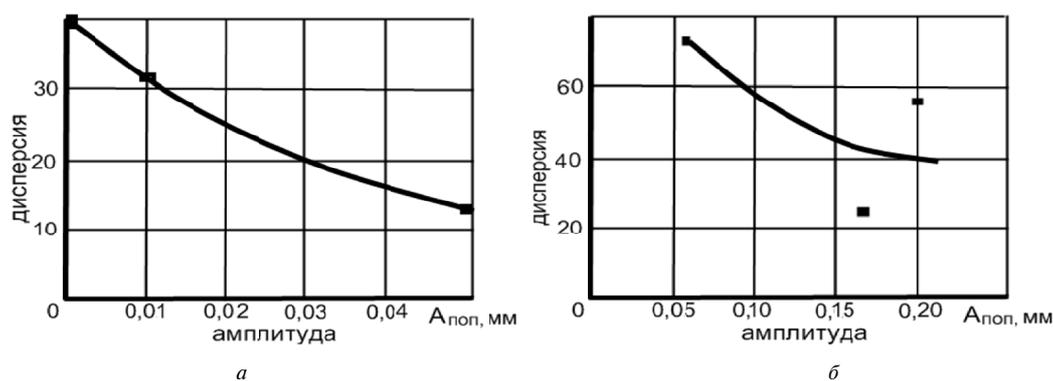


Рис. 5. Изменение дисперсии тангенциальной составляющей силы трения при сканировании образцов сплава ХТН-61 – а) и ВТ20 – б)

вида соответствующих трибограмм 1 и 2, можно предположить, что при трении с поперечными перемещениями больших амплитуд не происходит образование подобных пленок.

Таким образом, отмеченные результаты исследований подтверждают положение о том, что 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. Исследуемое сложное динамическое нагружение характеризуется переменным деформированием и неизбежно сопровождается возвратно-поступательным движением дислокаций. Многокомпонентный характер нагружения приводит к изменению интенсивности процесса возвратно-поступательного движения дислокаций и связанного с ним развития микроповреждений металла, которое определяется структурным состоянием материала.

Необходимо учитывать, что наблюдаемая динамическая адаптация материала пары трения – поверхностного слоя контактирующих деталей к условиям эксплуатации является результатом действия самоорганизующейся системы. В местах непосредственного контакта происходит направленная деформация – текстурирование поверхностных объемов металла, зависящее от вида деформации, температуры и структурно-фазового состояния металла, в частности, от типа его решетки.

Известно, что текстура является результатом вытягивания 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 [9].

Приведенные результаты исследований позволяют предположить, что трехкомпонентное 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 частности, возвратно-поступательные движения во взаимно перпендикулярных направлениях приводят к формированию в поверхностном слое ячеистой структуры с не столь вытянутыми ячейками, а при равной амплитуде и частоте колебаний – к отсутствию вытяжки фрагментов. Соответственно повышение амплитуды поперечных проскальзываний до определенного предела способствует образованию уровня внешних напряжений, необходимых для действия механизма ротационной пластичности в анализируемых структурах. В результате образуется поверхностный слой с более равномерной текстурой, снижается его прочность, что сопровождается повышением износа. Изменение характера нагружения приводит к изменению состояния поверхностного слоя и, как следствие, изменению износостойкости трибосоприжения.

Кроме того, отмеченная ранее нелинейность зависимости объемной интенсивности изнашивания от амплитуды поперечных проскальзываний и замедление роста износа при увеличении амплитуды поперечных проскальзываний больше определенного предельного значения могут быть связаны с количеством дислокаций в поверхностном слое. Увеличение амплитуды поперечных проскальзываний в условиях многокомпонентного характера динамического нагружения неизбежно приводит к увеличению количества дислокаций у границ зерен. При большой плотности дислокаций усиливается их взаимодействие, происходит их закрепление, которое в свою очередь затрудняет выход на поверхность металла новых дислокаций и сопутствующих де-

фектов. Количество активных центров на поверхности перестает нарастать, достигнув насыщения, что сопровождается снижением роста интенсивности изнашивания при увеличении амплитуды поперечных проскальзываний.

Выводы

Таким образом, можно предположить, что износостойкость материала при многокомпонентном динамическом нагружении в большой степени определяется способностью адаптироваться к условиям нагружения и выражается в изменении структурного состояния поверхностного слоя, однородности его прочностных и деформационных свойств. Это объясняет приведенные выше данные исследований о том, что чем более износостойким в условиях опытов является материал, тем меньше влияние амплитуды поперечных проскальзываний на величину интенсивности изнашивания и меньше величина предельной амплитуды поперечных проскальзываний при трехкомпонентном нагружении.

Исследования закономерностей износа различных материалов, трансформации структуры и особенностей структурного состояния, деформированных при трении поверхностных слоев металла при многокомпонентном динамическом нагружении, 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. При этом определение закономерностей и разработка условий формирования износостойкого поверхностного слоя деталей трибосопряжений должны производиться на основе анализа величины износа и состояния поверхности с учетом реального вида нагружения.

Список литературы

1. Бершадский Л. И. Борис Иванович Костецкий и общая концепция в трибологии / Бершадский Л. И. // Трение и износ. — 1993. — Т. 14, № 1. — С. 6–8.
2. Костецкий Б. И. Структура и поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий // Проблемы прочности. — 1981. — №3. — С. 90–93.
3. Івшенко Л. І. Ускоренні випробування складнонавантажених деталей трибосопряжень / Л. І. Івшенко, В. В. Цыганов, В. І. Черний // Вісник двигунобудування. — 2009. — № 1. — С. 150–154.
4. Пат. 39986 Україна, МПК G01N3/56. Пристрій для дослідження тертя / Івшенко Л. Й., Цыганов В. В., Чорний В. І. // Запорізький національний технічний університет. — №и200810724; заявл.2008.28.08; опубл. 2009.25.03, Бюл. № 6.
5. Цыганов В. В. Зв'язок структурного стану поверхневого шару та зносостійкості деталей трибоз'єднань при тримірному навантаженні / В. В. Цыганов, Л. Й. Івшенко // Вісник двигунобудування. — 2008. — № 2. — С. 57–62.
6. Івшенко Л. І. Особенності изнашивания трибосопряжень в умовах трьохмерного навантаження / Л. І. Івшенко, В. В. Цыганов, І. М. Закиєв // Трение и износ. — 2011. — Т. 32, № 1. — С. 500–509.
7. Ігнатівич С. Р. Оцінка пошкодженості поверхневого шару матеріалів при циклічних навантаженнях методами наноіндентифікації та наносклерометрії / С. Р. Ігнатівич, І. М. Закиєв, Д. І. Борисов // Проблемы прочности. — 2006. — № 4. — С. 132–139.
8. Petrova A. M. The influence of Nanostructural oxide films on wear – resistance of titanium materials, Proctding of the NATO Advanced Research Workhop on Using Carbon Nanomaterials in Clean / Petrova A. M., Shtern M. B. — Energy Hydrogen Systems, 2008. — P. 851–856.
9. Арышенский Ю. М. Теория и расчеты пластического формоизменения анизотропных материалов / Ю. М. Арышенский, Ф. В. Гречников. — М. : Металлургия, 1990. — 304 с.

Поступила в редакцию 06.10.2013

Івшенко Л.Й., Циганов В.В. Структурна організація матеріалів складнонавантажених трибоз'єднань

Розглянуті питання структурного пристосування поверхневого шару деталей трибоз'єднань при терті в умовах складного динамічного навантаження. Показаний зв'язок трансформації структури, особливостей структурного стану деформованих при терті поверхневих шарів металу і зносостійкості.

Ключові слова: знос, зносостійкість, поверхневий шар, структурний стан

Ivschenko L., Tsyganov V. Structural organization of materials of difficult loading of tribojoints

The questions of structural adaptation of superficial layer of details of tribojoints are considered at a friction in the conditions of difficult dynamic loading. Connection of transformation of structure is rotined, features of the structural state of the superficial layers of metal deformed at a friction and wearproofness.

Key words: wear, wearproofness, superficial layer, structural state.