

**Микосянчик О.А.,\***  
**Мнацаканов Р.Г.,\***  
**Калиниченко В.И.,\*\***  
**Кущев А.В.\***

\* Национальный авиационный университет,  
г. Киев, Украина

\*\* Институт проблем прочности  
им. Г.С. Писаренка НАН Украины,  
г. Киев, Украина

**E-mail:** oksana.mikos@bk.ru

**ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ,  
РЕОЛОГИЧЕСКИХ И ПРОТИВОИЗНОСНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК КОНТАКТА  
В УСЛОВИЯХ КАЧЕНИЯ  
С ПЕРЕМЕННЫМ СКОЛЬЖЕНИЕМ**

УДК 621.891

Установлены закономерности изменения удельной работы трения в условиях прекращения подачи смазочного материала от типа вторичных структур, сформированных на контактных поверхностях в условиях качения с разной степенью проскальзывания контактных поверхностей. Определена кинетика изменения энергетических, смазывающих и реологических характеристик контакта при схватывании контактных поверхностей. Рассмотрено влияние удельной работы трения, вторичных структур, степени упрочнения - разупрочнения поверхностных слоев металла, интенсивности насыщения активными элементами приповерхностных слоев металла на износостойкость пар трения.

**Ключевые слова:** вторичные структуры, удельная работа трения, износ, реологические свойства, микротвердость.

#### **Актуальность задачи**

Активация контактных поверхностей при трении является комплексным процессом, зависящим от степени воздействия на трибосистему внешних (нагрузочно-скоростных, температурных) и внутренних (фракционный состав и наличие полифункциональных присадок смазочного материала, механические и прочностные характеристики материала пар трения) факторов. Изучение процессов взаимного влияния этих факторов при самоорганизации трибосистемы позволит определить кинетику изменения триботехнических свойств контакта и выявить основные механизмы, определяющие износостойкость контактных поверхностей. Износостойкость металла определяется не только структурой металла в исходном состоянии, но и структурой, формирующейся в результате протекания механо-химических процессов, происходящих при трении. Установление взаимосвязи процессов накопления энергии во вторичных структурах и изнашивания является важной структурно-энергетической характеристикой, во многом определяющей долговечность контактных поверхностей. Это, в свою очередь, позволит решить вопросы, связанные с прогнозированием ресурса работы пар трения с локальной формой контакта.

#### **Обзор публикаций**

Трение представляет собой процесс преобразования энергии.

Согласно [1], при трении происходит преобразование внешней механической энергии в энергию внутренних процессов. В данной работе предложена оценка энергетических процессов при трении на макроуровне по коэффициенту потерь на трение. Данный параметр отображает диссипативный характер процесса трения, учитывая энергетические потери в трибосистеме. Коэффициент потерь на трение зависит не только от свойствах контактирующих тел, но и от нагрузки, скорости скольжения, условий окружающей среды и др.

В работах [2 - 4] на основании первого закона термодинамики смоделировано преобразование энергии фрикционного контакта в энергию деформации, энергию разрушения и тепловую энергию. В условиях скольжения максимальное распределение выделяемого тепла за счет деформации концентрируется в поверхностном слое и резко сокращается с увеличением расстояния от контактной поверхности.

Линейная корреляция между износом и рассеиваемой энергией установлена в работах [5 - 7]. Кроме того, количественный показатель диссипации энергии можно рассматривать как показатель изменений механических и структурных свойств контактирующих тел.

Большая часть энергии трения накапливается внутри вторичных структур, образование которых происходит в процессе самоорганизации трибосистемы [8, 9]. Таким образом, вторичные структуры являются устойчивой зоной первичной диссипации энергии, способные к накоплению большей части энергии трения. В поверхностных слоях металла при трении одновременно протекает множество процессов. Примерами в трибологии таких процессов являются: образование мартенсита в процессе трения в поверхностных слоях стали с нестабильной исходной структурой аустенита [10]; диффузионное перенасы-

щение феррита углеродом в результате упруго-пластических взаимодействий при контакте шероховатых стальных поверхностей; термодинамические реакции образования FeO и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> при одновременном уменьшении доли Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до его исчезновения [11]; формирование диссипативных структур в паре трения сталь – бронза, обуславливающие уменьшение коэффициента трения и увеличение нагрузки схватывания [12]; образование граничных смазочных слоев на контактных поверхностях [13] и др.

В работе [14] на основании термодинамического анализа многослойных покрытий с наноразмерной толщиной установлено, что формирование трибоплёнок является сильнонеравновесным процессом, который приводит к уменьшению производства энтропии. Этот неравновесный процесс требует много энергии, таким образом, трибосистема поглощает энергию, которая могла бы повредить поверхность, что существенно снижает скорость износа.

Экспериментальные исследования пары трения бронза Бр.АЖМц 10-3-1,5 / сталь ШХ-15 в смазке АМГ-10 показали образование вторичных структур на поверхности бронзы толщиной 70-100нм, содержащих до 90% углерода [15]. Большое содержание углерода обусловлено механодеструкцией углеродсодержащих молекул смазки и адсорбцией образованных радикалов на металлической поверхности. Однако, при замене стали в данной паре трения на дегонационную систему TiC – Co, происходит избирательное растворение легирующих элементов из бронзы. В результате взаимопереноса на поверхности бронзы образуется слой аморфизированной меди толщиной 400-700нм. Таким образом, формирование вторичных структур достаточно индивидуальный процесс, зависящий от множества внутренних и внешних факторов.

Трение инициирует и ускоряет химические реакции, которые в аналогичных внешних условиях протекают при гораздо более высоких температурах. Однако, объяснения механизмов химических и физико-химических изменений твердых тел из-за влияния механической энергии до сих пор противоречивы [16, 17]. В работе [18] описывается общая анионно-радикальная модель смазки, основанная на механизме ионизации смазочных компонентов нефти под действием экзоелектронов низкой энергии (1 - 4 эВ), испускаемых из свежобразованной поверхностей при трении металлических поверхностей. Смазочные компоненты, в особенности противозносные и противозадирные присадки, взаимодействующие с экзоелектронами, образуют отрицательные ионы, которые затем хемосорбируются на положительно заряженных областях поверхностей трения. Таким образом, создается граничная пленка, характеризующаяся особыми свойствами, отличными от объёмных свойств смазочного материала. Эта пленка может выдерживать экстремальные температуры и механические нагрузки и сводит к минимуму непосредственный контакт между поверхностями, предотвращая их схватывание и повышая нагрузку заедания [19, 20].

Таким образом, краткий анализ научных исследований, связанных с установлением закономерностей изменения структурно-энергетических характеристик контакта с износостойкостью, показывает, что большинство работ направлено на изучение триботехнических характеристик пар трения скольжения. Однако, аналогичные исследования для пар трения качения и, особенно, качения с переменным проскальзыванием, составляющих значительную долю пар трения машин и механизмов (подшипники качения, зубчатые передачи), являются немногочисленными и нуждаются в дальнейшем углубленном анализе.

### **Цель работы**

Целью работы являлось исследование влияния различной степени проскальзывания контактных поверхностей на кинетику изменения удельной работы трения, смазывающих свойств и износостойкости контактных поверхностей в условиях прекращения подачи смазочного материала в зону контакта.

### **Материалы и методика исследований**

Исследования проводились на устройстве для оценки триботехнических характеристик трибоэлементов [21]. Момент трения, частота оборотов роликов, температура смазочного материала, падение напряжения в смазочном слое в контакте записываются и обрабатываются на ПК (программное обеспечение ProfiLab) в реальном масштабе времени с графическим изображением их изменений.

Исследуемые нестационарные условия трения подразумевали цикличность проведения экспериментов в режиме запуск – стационарная работа – торможение – остановка (рис. 1).

Участок I соответствует начальному периоду работы пар трения и характеризуется постепенным увеличением скорости качения роликов, при этом  $V_{ск} = 0$ . На участке II достигается заданное максимальное проскальзывание роликов, скорости качения пар трения на этом периоде работы постоянны. Участок III соответствует торможению, для которого характерны два периода: первоначальное уменьшение скорости качения роликов с сохранением заданного проскальзывания в точке А и постепенным уменьшением степени проскальзывания до нуля в точке В (III, а). Дальнейшее торможение происходит в условиях одновременного уменьшения скорости качения обоих роликов при сохранении условия  $V_{ск} = 0$  (III, б). Участок IV соответствует остановке. Если спроецировать выбранный цикл на зубчатое

эвольвентное зацепление, то полюсная зона зацепления соответствует участкам I и III, б, околополюсная зона – участку III, а, крайние точки зацепления с максимальным проскальзыванием – участку II.

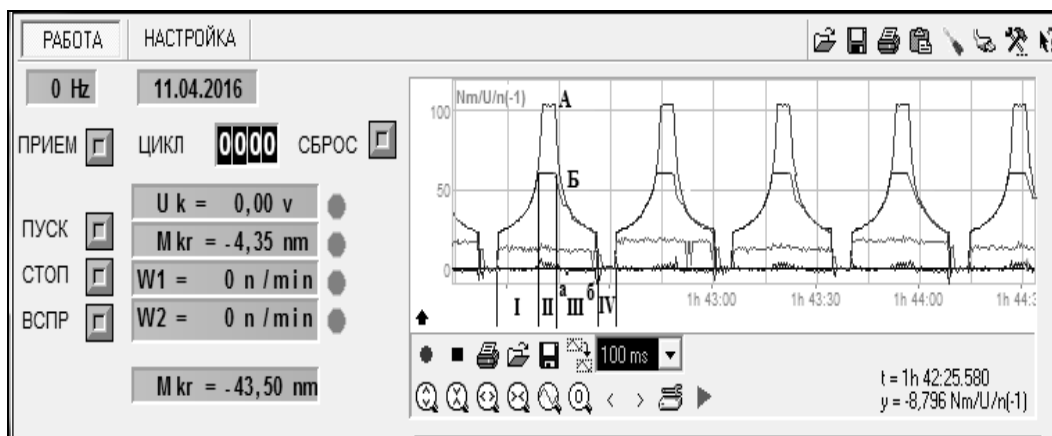


Рис. 1 – Схема работы трибосистемы в нестационарных условиях трения:  
участок I – запуск; участок II – стационарная работа;  
участок III – торможение; участок IV – остановка

Максимальная частота оборотов для опережающей поверхности составила 1000 об/мин. В работе имитировалось проскальзывание 3, 10, 20, 30 и 40 %. Максимальное контактное напряжение по Герцу – 250 МПа.

В качестве образцов использовались ролики из стали 45 (HRC 38, Ra 0,57 мкм). Смазывание контактных поверхностей осуществлялось окунанием нижнего ролика в ванночку с маслом. В качестве смазочного материала использовалось минеральное трансмиссионное масло для механических коробок передач и главных передач легковых и грузовых автомобилей Okko GL-4 80w/90. Объемная температура масла – 20 °C.

Толщина смазочных слоев измерялась методом падения напряжения в режиме нормального тлеющего разряда [22]. Микротвердость поверхностных слоев металла измерялась на приборе ПМТ-3. Измерение массовой доли элементов проводилось методом рентгеновского микроанализа в режиме высокого вакуума на растровом электронном микроскопе РЭМ-106И.

Приработка контактных поверхностей длительностью 100 циклов и последующая работа пар трения на протяжении 400 циклов осуществлялась в условиях обильной смазки, после чего прекращалась подача смазочного материала. Общее количество циклов в каждом эксперименте составило: 500 (обильная смазка путем окунания нижнего ролика в ванночку с маслом), 400 (имитация режима масляного голодания за счет прекращения регулярной подачи смазочного материала из ванночки в зону контакта), 100 (принудительное удаление смазочного материала с контактных поверхностей путем вытирания роликов ветошью).

### Результаты исследований

В условиях отсутствия подачи смазочного материала в зону контакта по-разному изменяется энергоемкость трибосистемы в зависимости от степени проскальзывания контактных поверхностей.

Минимальная удельная работа трения характерна для контактных поверхностей, работающих на участке II с проскальзыванием 3 %. Если в период пуска в условиях чистого качения удельная работа трения составляла 2 - 5 Дж/мм<sup>2</sup>, то в период проскальзывания данный параметр увеличивается в 2 раза. Это минимальное приращение удельной работы трения, по сравнению с другими исследуемыми образцами. Только для этих контактных поверхностей установлено снижение  $A_{mp}$  в 12 раз на участке II, по сравнению с режимом обильной подачи смазочного материала в зону контакта. Во-первых, это связано с физической природой сформированных граничных плёнок, которые вследствие слабых адгезионных сил взаимодействия легко десорбируются с поверхностей трения, тем самым обеспечивая снижение теплоемкости в контакте. Во-вторых, предварительно пластифицированные слои металла в результате проявления эффекта Ребиндера (микротвёрдость  $H_{100}$  контактных поверхностей снижается, в среднем, на 1000 МПа) оказывают незначительное сопротивление касательным напряжениям.

Для пар трения, работающих на участке II с проскальзыванием 10 - 30 %, отсутствие регулярной подачи смазочного материала в зону контакта приводит к повышению его энергоемкости. Удельная работа трения как в условиях чистого качения при пуске (участок I), так и в условиях качения с проскальзыванием (участок II) увеличивается, в среднем, в 1,75 раз, по сравнению с обильной смазкой (рис. 2).

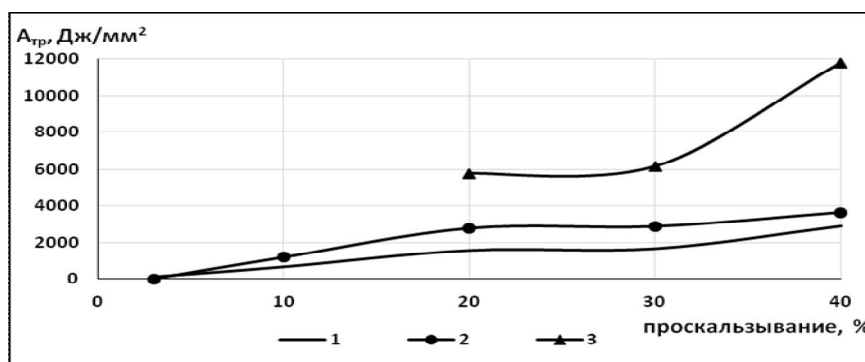


Рис. 2 – Влияние степени проскальзывания на кинетику изменения удельной работы трения в контакте:

- 1 – режим качения со скольжением, обильная смазка;
- 2 – режим качения со скольжением, ограниченная смазка;
- 3 – момент схватывания в режиме качения со скольжением

При этом сохраняется аналогичная закономерность, установленная в условиях обильного смазывания: показатели удельной работы трения при смене режима чистого качения (участок I) на качение с проскальзыванием (участок II) в диапазоне 10 - 30 % повышаются. Однако, если в условиях достаточного поступления смазочного материала в зону контакта возрастание  $A_{тр}$  зафиксировано в 330 – 400 раз, то в режиме ограниченной смазки это увеличение составило 120 - 125 раз. Мы полагаем, что это связано с эффективной структурной приспособляемостью системы в процессе её самоорганизации в неустановившихся условиях трения. В режиме обильной смазки, которая включала и 120 циклов приработки, происходил интенсивный износ контактных поверхностей вследствие формирования эксплуатационной шероховатости и смены физически адсорбированных граничных слоёв хемосорбционными плёнками. Изменение природы граничных плёнок повлекло за собой первоначально проявление пластифицирующего эффекта Ребиндера (микротвёрдость контактных поверхностей уменьшилась, в среднем, на 1000 МПа до 230 цикла наработки). Однако при дальнейшей наработке происходило постепенное упрочнение контактных поверхностей и структурно-фазовые изменения в поверхностных слоях. Указанные процессы достаточно энергоёмкие, что проявилось в высоких показателях удельной работы трения. В момент прекращения регулярной подачи смазочного материала в зону трения контактные поверхности свободно разделялись граничными хемосорбционными плёнками, металлического контакта не зафиксировано. Высокие антифрикционные и противоизносные свойства данных слоёв [23, 24] обеспечивали нормальную работу трибосопряжения. Однако, частое проявление в контакте граничного и смешанного режимов смазочного действия несколько увеличило энергоёмкость контакта, по сравнению с обильной смазкой.

Принудительное удаление смазочного материала на 400 цикле привело к незначительному увеличению удельной работы трения, в среднем, в 1,1 раза. Но если контактные поверхности с проскальзыванием 10% сохраняли свою работоспособность на протяжении последующих 100 циклов наработки, то для поверхностей с проскальзыванием 20 и 30% проявились первые признаки схватывания на 490 и 430 цикле соответственно. При этом установлено резкое повышение удельной работы трения до 5780 и 6176 Дж/мм<sup>2</sup> для поверхностей с проскальзыванием 20 и 30 % соответственно. Это связано с необратимыми изменениями в трибосистеме: происходит стремительное увеличение градиента скорости сдвига и напряжения сдвига смазочных слоёв, деструкция которых проявляется в снижении эффективной вязкости в контакте, что приводит к частому металлическому контакту и схватыванию пар трения.

Контактные поверхности с проскальзыванием 40 % на участке II характеризуются совершенно иной закономерностью кинетики изменения удельной работы трения при переходе трибосистемы в режим ограниченного смазочного действия. До 400 цикла наработки, когда масло не удалялось с контактных поверхностей, в 50 % циклов показатели  $A_{тр}$  аналогичны значениям, установленным для условий обильного смазывания. Однако в других циклах наработки происходит периодическое стремительное возрастание удельной работы трения в 4 - 6 раз с последующим её снижением и стабилизацией (рис. 3).

Высокая скорость скольжения, достигающая 1,14 м/с, резко повышает энергоёмкость контакта – удельная работа трения увеличивается, в среднем, в 608 раз, по сравнению с участком I, где при пуске реализуется чистое качение. Это незначительно отличается от усреднённых показателей прироста  $A_{тр}$  в условиях обильной смазки: при переходе от режима чистого качения к качению с проскальзыванием удельная работа трения увеличивается в 580 раз. Однако, в периоды стремительного возрастания удельной работы трения на участке II прирост данного параметра составил 1000 раз. Эти периоды совпадают с циклами наработки, для которых установлено стремительное разрушение толщины смазочной плёнки в контакте.

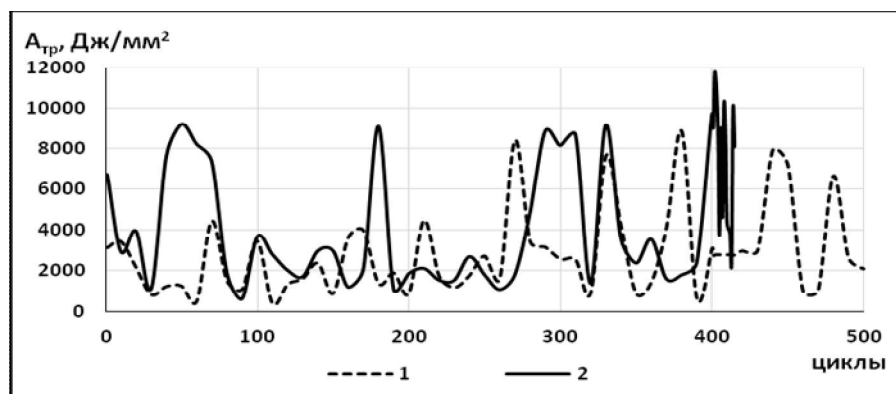


Рис. 3 – Кинетика изменения удельной работы трения в условиях обильной смазки (1) и ограниченного смазочного действия (2)

При принудительном удалении смазочного материала ( $N > 400$  циклов) твердокристаллические граничные слои, сформированные на контактных поверхностях с 40 % проскальзыванием, характеризуются наименьшими прочностными свойствами. Увеличение градиента скорости сдвига в 1,74 раза и касательных напряжений сдвига смазочных слоёв в 1,6 раз способствует механической и термической деструкции граничных плёнок, их плавлению. В этих условиях происходит резкое повышение энергоёмкости контакта – удельная работа трения колеблется в диапазоне 2000 - 12000 Дж/мм<sup>2</sup>, при  $N = 415$  циклах наблюдаются первые признаки схватывания контактных поверхностей.

Согласно [25], работа сил трения превращается в теплоту и энергию структурных изменений. При этом основную часть энергии структурно-термической активации составляет теплота. При максимальном проскальзывании 40 % структурированные твердокристаллические плёнки смазочного материала не способны создать нормальные условия для отвода тепла. Это приводит к возрастанию роли тепловых явлений в контакте до предельных значений, проявляется доминирование деструкционных процессов в зоне трения (десорбция граничных слоёв, разрушение метастабильных вторичных структур и т.д.), что обуславливает проявление первых признаков схватывания контактных поверхностей.

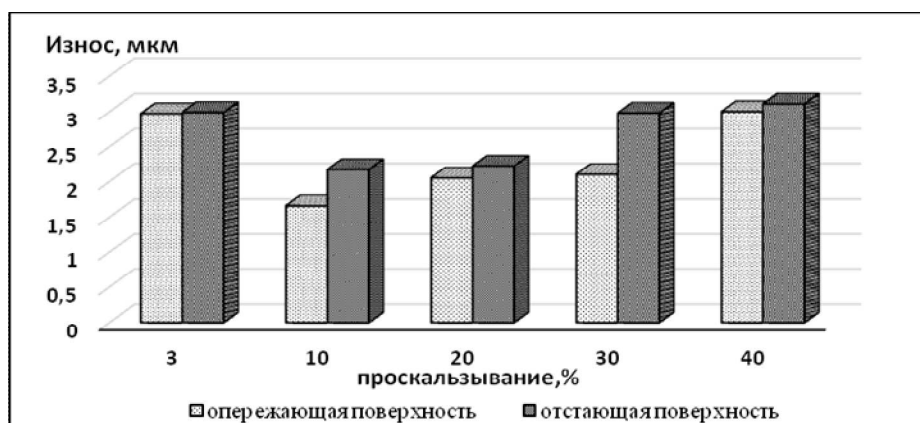


Рис. 4 – Линейный износ контактных поверхностей в условиях качения с проскальзыванием

Рассмотрим вопрос об энергетической связи удельной работы трения и износа элементов трибосопряжения. Общий линейный износ опережающей и отстающей поверхностей при работе пар трения в условиях обильной смазки, ограниченного смазывания и принудительного удаления смазочного материала представлен на рис. 4.

Если при увеличении проскальзывания от 10 до 40 % прослеживается чёткая тенденция к снижению износостойкости контактных поверхностей, то для минимального проскальзывания установлен достаточно высокий износ. Объяснение полученных результатов, на наш взгляд, лежит в плоскости идентификации типов вторичных структур, которые образуются на контактных поверхностях в результате структурной приспособляемости при трении. Мы полагаем, что на поверхностях трения с проскальзыванием 3 % образуются вторичные структуры I типа, которые, согласно Костецкому Б.И. [26], обладают свойствами сверхпластичности, мало насыщены активными элементами и характеризуются низкими показателями удельной работы трения при формировании. Подтверждением наших предположений служат

следующие установленные закономерности. Во-первых, полученные результаты определения массовой доли элементов методом рентгеновского микроанализа на глубине 20 - 50 мкм под поверхностью трения свидетельствуют о том, что элементный состав приповерхностных слоёв при трении идентичен исходному материалу, что характеризует его низкую активационную способность в результате протекания механо – химических процессов (рис. 5, табл.1).

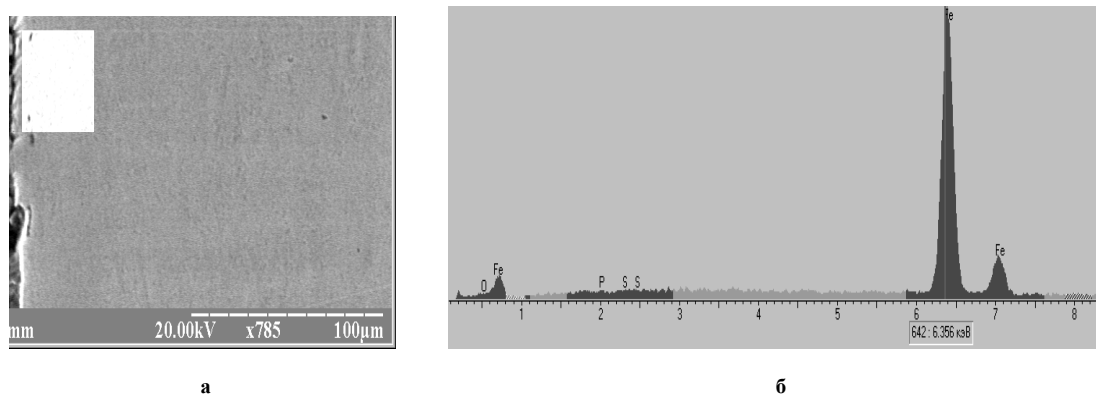


Рис. 5 – Область определения массовой доли элементов в металле (а) и интенсивность характеристических спектров анализируемых элементов (б)

Таблица 1

**Концентрация массовой доли анализируемых элементов (С, %) в приповерхностных слоях металла**

Элемент	Исходный металл	Отстающая поверхность с проскальзыванием, %		
		3	20	40
O	0,65	0,58	0,75	1,02
P	0,03	0,03	0,05	0,03
S	0,05	0,05	0,12	0,15
Fe	99,27	99,34	99,08	98,8

Во-вторых, показатели удельной работы трения для этих поверхностей характеризуются наименьшими значениями, по сравнению с 10 - 40 % проскальзыванием, что свидетельствует о незначительной энергоёмкости контакта как вследствие доминирования скоростей качения, так и реализацией преимущественно гидродинамического режима смазочного действия. В третьих, о сверхпластичности образованных вторичных структур свидетельствует высокая степень разупрочнения поверхностных слоёв (микротвёрдость опережающей и отстающей поверхностей уменьшается на 990 и 940 МПа соответственно) и аморфизация приповерхностных слоёв металла на глубину 40 - 50 мкм.

Характер изменения микротвёрдости приповерхностных слоёв свидетельствует о наличии положительного градиента их механических свойств по глубине. Однако, аморфизированный слой характеризуется высокой степенью разупрочнения порядка 1100 - 1400 МПа, по сравнению с исходной поверхностью, что обусловлено проявлением пластифицирующего действия активных компонентов смазочного материала.

Таким образом, снижение износостойкости контактных поверхностей с 3 % проскальзыванием происходит вследствие низкой активации, формирования граничных адсорбционных слоёв физической природы, в результате чего образуются вторичные структуры I типа и проявляется сильное пластифицирование поверхностных и приповерхностных слоёв металла.

В диапазоне проскальзывания 10 - 40 % реализуются другие механизмы износа элементов трибосопряжения. Возрастание удельной работы трения на участке проскальзывания вследствие увеличения скорости скольжения обуславливает механо–термическую активацию контактных поверхностей. Это создаёт предпосылки для образования на поверхностях трения более стойких граничных слоёв смазочного материала – хемосорбционных плёнок, а поверхностные слои металла формируют вторичные структуры II типа [27]. Приведём фактические результаты, подтверждающие образование этих структур. Во-первых, приповерхностные слои металла на глубине до 50 мкм насыщаются активными элементами – увеличивается массовая доля кислорода и серы (табл. 1). Во-вторых, поверхностные слои металла характеризуются повышением прочностных свойств, что проявляется в увеличении их микротвёрдости при наработке (рис. 6).

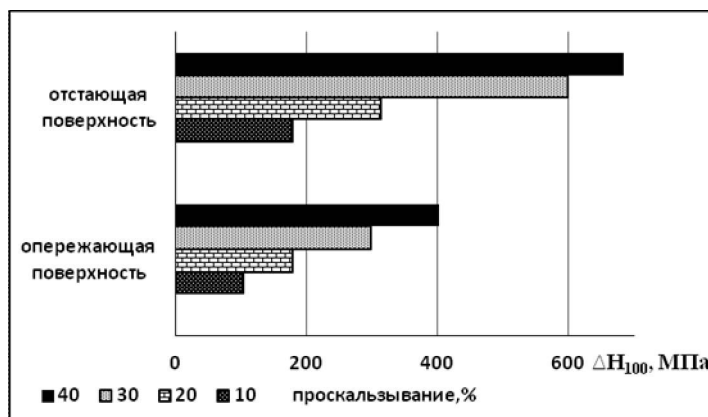


Рис. 6 – Степень упрочнения поверхностных слоев стали при работе в условиях качения с проскальзыванием

Прослеживается четкая закономерность в степени упрочнения опережающей и отстающей поверхностей от проскальзывания: с увеличением проскальзывания повышается упрочнение контактных поверхностей, которое происходит вследствие увеличения деформационной составляющей коэффициента трения при возрастании скорости скольжения от 0,315 м/с до 1,14 м/с при 10 % и 40 % проскальзывания соответственно. Сложное напряженное состояние приповерхностных слоев металла при увеличении механического и теплового воздействия в условиях одновременного влияния нормальных и касательных напряжений приводит к их интенсивной деформации и возрастанию удельной работы трения в контакте. Эти факторы являются первостепенными в снижении износостойкости контактных поверхностей в условиях качения при увеличении степени проскальзывания.

### Выводы

1. Установлено снижение удельной работы трения в 12 раз в условиях прекращения подачи смазочного материала в зону трения при качении с проскальзыванием 3 %, что обусловлено физической природой сформированных граничных пленок, их низким сопротивлением касательным напряжениям сдвига, пластифицированием поверхностных слоев металла.

2. Повышение удельной работы трения в 1,75 раз, по сравнению с обильной смазкой, для контактных поверхностей с проскальзыванием 10 - 30 % обусловлено увеличением степени проявления в контакте граничного и смешанного режимов смазочного действия. Стремительное возрастание энергоемкости контакта коррелирует с периодами разрушения толщины смазочной пленки.

3. Увеличение скорости скольжения при проскальзывании 20 - 40 % в условиях принудительного удаления смазочного материала приводит к возрастанию роли тепловых явлений, десорбции граничных слоев, разрушению метастабильных вторичных структур, резкому повышению удельной работы трения, что обуславливает проявление первых признаков схватывания контактных поверхностей. В периоды схватывания установлены общие закономерности реологических свойств граничных пленок смазочного материала, характеризующие необратимые изменения в трибосистеме: стремительное увеличение градиента скорости сдвига, напряжения сдвига смазочных слоев, снижение эффективной вязкости в контакте.

4. Установлена взаимосвязь энергетического параметра (удельной работы трения) и износостойкости стали от типов вторичных структур, образующихся на контактных поверхностях в процессе самоорганизации. Для вторичных структур I типа характерны низкие показатели удельной работы трения, высокая степень разупрочнения поверхностных слоев металла, аморфизация приповерхностных слоев металла на глубину 40 – 50 мкм, отсутствие насыщения активными элементами, что приводит к снижению их износостойкости. Вторичные структуры II типа характеризуются повышением износостойкости вследствие увеличения энергоемкости контакта, формирования граничных хемосорбционных пленок, упрочнения поверхностных слоев металла, увеличения массовой доли кислорода и серы в приповерхностных слоях металла на глубине до 50 мкм.

### Литература

1. Rymuza C. Energy concept of the coefficient of friction / C. Rymuza // Wear. - 1996. – Vol.199. – P.187–196.
2. Chen Q. A computational study of frictional heating and energy conversion during sliding processes / Q. Chen, D.Y. Li // Wear. – 2005. – Vol.259. – P.1382–1391.

3. Elalem, K. Modeling abrasive wear of homogeneous and heterogeneous materials / K. Elalem, D.Y. Li, M.J. Anderson, S. Chiovelli // ASTM STP. – 2001. – Vol.1339. – P.90–104.
4. Chen Q. Investigation on the mechanisms of corrosive wear process of alloy with a micro-scale dynamic model / Q. Chen, D.Y. Li // Mater. Sci. Eng. A. – 2004. – Vol.369. – P.284–293.
5. Jahangiri M. Investigation of the Slipping Wear based on the Rate of Entropy Generation/ M. Jahangiri // Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production. – 2014. – Vol. 3, No. 1. – P.47–57.
6. Colaco R. An energy-based model for the wear of UHMWPE / R. Colaco, M.P. Gispert, A.P. Serrob, B. Saramago // Tribol. Lett. – 2007. – Vol. 26. – P.119–124.
7. Nurnberg K.E. Simulation of wear on sheet metal forming tools—An energy approach / K.E. Nurnberg, G. Nurnberg, M. Golle, H. Hoffmann // Wear. – 2008. – Vol. 265. – P.1801–1807.
8. Bershadsky L.I. On self-organizing and concept of tribosystem / L.I. Bershadsky // J. Frict. Wear. – 1992. – Vol.13. – P.101–114.
9. Klamecki B.E. An entropy-based model of plastic deformation energy dissipation in sliding / B.E. Klamecki // Wear. – 1984. – Vol.96. – P.319–329.
10. Жаров А.В. Влияние структурных превращений при трении на работоспособность сопряжения верхнее компрессионное кольцо – гильза цилиндра автомобильного дизеля / А.В. Жаров, В.Г. Новиков, А.А. Павлов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – № 2. – С. 83-86.
11. Żurowski W. Structural factors contributing to increased wear resistance of steel friction couples / W. Żurowski // Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability. – 2012. – Vol.14 (1). – P.19–23.
12. Gershman I. S. Self-Organization during Friction of Slide Bearing Antifriction Materials / I. S. Gershman, A. E. Mironov, E. I. Gershman, G. S. et al. // Entropy. – 2015. – Vol.17. – P.7967–7978.
13. Voronin S.V. Increase in resource of slider bearings by means of formation intensification of boundary lubricating layer/ S.V.Voronin, I.S.Grunyk, V.V.Tkach // Nauka I studia: Przemysl. – 2013. – № 7(75). – P.18–31.
14. Погребняк А.Д. Особенности термодинамических процессов на контактных поверхностях многокомпонентных нанокompозитных покрытий с иерархическим и адаптивным поведением / А. Д. Погребняк, К. А. Дядюра, О. П. Гапонова // Металлофиз. новейшие технол. – 2015. – Т. 37, № 7. – С. 899 - 919.
15. Кульгавий Е. А. Трибологічні структури в антифрикційних системах / Е.А. Кульгавий // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2012. – Вип. 58. – С. 26 - 31.
16. Schey J.A. Tribology in Metalworking - Friction, Lubrication and Wear / J.A. Schey. - Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1983. – 736p.
17. Heinicke, G. Tribochemistry / G. Heinicke.- Berlin.: Akademie-Verlag, 1984.- 495 p.
18. Kajdas C. Importance of Anionic Reactive Intermediates for Lubricant Component Reactions with Friction Surfaces / C. Kajdas // Lubrication Science. – 1994. – Vol.6. - P.203-228.
19. Battez A.H. Friction reduction properties of a CuO nanolubricant used as lubricant for a NiCrBSi coating / A.H. Battez, J.L. Viesca, R. González et al. // Wear. - 2010. – Vol.268. – P.325–328.
20. Masabumi M. Prevention of oxidative degradation of ZnDTP by microcapsulation and verification of its antiwear performance / M. Masabumi, S. Hiroyasu, S. Akihito, K. Osamu // Tribology International. – 2008. - Vol.41. – P.1097–1102.
21. Патент на корисну модель №88748, МПК G 01 N 3/56 Пристрій для оцінки триботехнічних характеристик трибоелементів / Мікосянчик О.О. – u 2013 13450, заявл. 19.11.13; опубл. 25.03.14, Бюл. №6 – 4 с.
22. Райко М.В. Исследование смазочного действия нефтяных масел в условиях работы зубчатых передач: дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук: 05.02.04 / Райко М.В. – К.: КИИГА, 1974. – 369с.
23. Дроздов Ю.Н. Противозадирная стойкость трущихся тел / Ю.Н. Дроздов, В.Г. Арчegov, В.И. Смирнов. – М. Наука, 1981. – 140с.
24. Baldwin B.A. The effect of adsorption and molecular structure of antiwear additives on wear mitigations / B.A. Baldwin // ASLE Transactions. – 1985. – Vol.28, №3. – P.381-388.
25. Рыбакова Л.М. Структура и износостойкость металла / Л.М.Рыбакова, Л.И.Куксенова. – М. : Машиностроение, 1982. – 212с.
26. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов. – К. : Техніка, 1976. – 296 с.
27. Костецкий Б.И. Механохимические процессы при граничном трении / Б.И. Ко стецкий, Л.И. Бершадский. – М. : Наука, 1972. – 170 с

Поступила в редакцію 23.08.2016



Mikosianchyk O.A., Mnatsakanov R.G., Kalinichenko V.I., Kushchev A.V. **Evaluation of energy, rheological and anti-wear characteristics of the contact under rolling with variable slip.**

Defined the regularities of change in the specific work of friction under lubrication outage from the secondary type structures formed on the contact surfaces in rolling conditions with different degrees of slippage. Determined kinetics of energy, lubrication and rheological characteristics of the contact under grasping of the contact surfaces. The effect of the specific work of friction, secondary structures, degree of hardening – softening of the surface layers of the metal, the intensity of saturation of the active elements in the surface layers of metal on wear resistance of the friction pairs are examined.

**Keywords:** secondary structure, specific work of friction, wear, rheological properties, microhardness.

### References

1. Rymuza C. Energy concept of the coefficient of friction. C. Rymuza. *Wear*. 1996, Vol.199, P.187–196.
2. Chen Q. A computational study of frictional heating and energy conversion during sliding processes. Q. Chen, D.Y. Li. *Wear*. 2005, Vol.259, P.1382–1391.
3. Elalem, K. Modeling abrasive wear of homogeneous and heterogeneous materials, K. Elalem, D.Y. Li, M.J. Anderson, S. Chiovelli. *ASTM STP*, 2001, Vol.1339, P.90–104.
4. Chen Q. Investigation on the mechanisms of corrosive wear process of alloy with a micro-scale dynamic model / Q. Chen, D.Y. Li. *Mater. Sci. Eng. A.*, 2004, Vol.369, P.284–293.
5. Jahangiri M. Investigation of the Slipping Wear based on the Rate of Entropy Generation. M. Jahangiri. *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*. 2014, Vol. 3, No. 1, P.47–57.
6. Colaco R. An energy-based model for the wear of UHMWPE. R. Colaco, M.P. Gispert, A.P. Serrob, B. Saramago. *Tribol. Lett.* 2007, Vol. 26, P.119–124.
7. Nurnberg K.E. Simulation of wear on sheet metal forming tools—An energy approach. K.E. Nurnberg, G. Nurnberg, M. Golle, H. Hoffmann. *Wear*. 2008, Vol. 265, P.1801–1807.
8. Bershadsky L.I. On self-organizing and concept of tribosystem. L.I. Bershadsky. *J. Frict. Wear*. 1992, Vol.13, P.101–114.
9. Klamecki B.E. An entropy-based model of plastic deformation energy dissipation in sliding. B.E. Klamecki. *Wear*. 1984, Vol.96, P.319–329.
10. Zharov A.B. Blijanie strukturnyh prevrashhenij pri trenii na rabotosposobnost' soprjazhenija verhnee kompressionnoe kol'co – gil'za cilindra avtomobil'nogo dizelja. A.V. Zharov, V.G. Novikov, A.A. Pavlov. *Dvigateli vnutrennego sgoranija*. 2008, №2, P.83–86.
11. Żurowski W. Structural factors contributing to increased wear resistance of steel friction couples. W. Żurowski. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 2012, Vol.14 (1), P.19–23.
12. Gershman I. S. Self-Organization during Friction of Slide Bearing Antifriction Materials, I. S. Gershman, A. E. Mironov, E. I. Gershman, G. S. et al. *Entropy*. 2015, Vol.17, P.7967–7978.
13. Voronin S.V. Increase in resource of slider bearings by means of formation intensification of boundary lubricating layer. S.V. Voronin, I.S. Grunyk, V.V. Tkach. *Nauka I studia: Przemysl*. 2013, № 7(75), P.18–31.
14. Pogrebnyak A. D. Osobennosti termodinamicheskikh processov na kontaktnyh poverhnostjakh mnogokomponentnyh nanokompozitnyh pokrytij s ierarhicheskim i adaptivnym povedeniem. A. D. Pogrebnyak, K. A. Djadjura, O. P. Gaponova. *Metallofiz. novjshie tehnol.* 2015, т. 37, № 7, P.899–919.
15. Kul'gavij E. A. Tribologichni strukturi v antifrikcijnih sistemah. E.A. Kul'gavij. *Problemi tertja ta znoshuvannja: nauk.-tehn. zb., K.: NAU*, 2012, No 58, P. 26–31.
16. Schey J.A. *Tribology in Metalworking - Friction, Lubrication and Wear*. J.A. Schey. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1983, 736p.
17. Heinicke, G. *Tribochemistry*. G. Heinicke.- Berlin.: Akademie-Verlag, 1984, 495 p.
18. Kajdas C. Importance of Anionic Reactive Intermediates for Lubricant Component Reactions with Friction Surfaces. C. Kajdas. *Lubrication Science*. 1994, Vol.6, P.203–228.
19. Battez A.H. Friction reduction properties of a CuO nanolubricant used as lubricant for a NiCrBSi coating. A.H. Battez, J.L. Viesca, R. González et al. *Wear*. 2010, Vol.268, P.325–328.
20. Masabumi M. Prevention of oxidative degradation of ZnDTP by microcapsulation and verification of its antiwear performance. M. Masabumi, S. Hiroyasu, S. Akihito, K. Osamu. *Tribology International*. 2008, Vol.41, P.1097–1102.
21. Patent na korisnu model' №88748, MPK G 01 N 3/56 Pristriy dlja ocinki tribotekhnichnih karakteristik triboelementiv. Mikosjanchik O.O. u 2013 13450, zajavl. 19.11.13; opubl. 25.03.14, Bjul. №6, 4p.
22. Rajko M.V. Issledovanie smazozhnogo dejstvija nefjnyh masel v uslovijah raboty zubchatyh poredach: dis. na soiskanie uchenoj stepeni doktora tehn. nauk: 05.02.04. Rajko M.V., K.: KIIIGA, 1974, 369p.
23. Drozdov Ju.N. Protivozadirnaja stojkost' trushhihsja tel. Ju.N. Drozdov, V.G. Arcegov, V.I. Smirnov, M. Nauka, 1981, 140p.
24. Baldwin B.A. The effect of adsorption and molecular structure of antiwear additives on wear mitigations. B.A. Baldwin. *ASLE Transactions*. 1985, Vol.28, №3, P.381–388.
25. Rybakova L.M. Struktura i iznosostojkost' metalla. L.M. Rybakova, L.I. Kuksenova. M.: Mashinostroenie, 1982, 212p.
26. Kosteckij B.I. Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii. B.I. Kosteckij, I.G. Nosovskij, A.K. Karaulov. Kiev: Tehnika, 1976, 296 p.
27. Kosteckij B.I. Mehanohimicheskie processy pri granichnom trenii. B.I. Kosteckij, L.I. Bershadskij, M.: Nauka, 1972, 170p.