

УДК 621.891

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ГРАДИЕНТА СКОРОСТИ СДВИГА НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА КОНТАКТА В РЕЖИМЕ ПУСК – ОСТАНОВКА

О. А. Микосянчик

Национальный авиационный университет

просп. Космонавта Комарова, 1, г. Киев, 03058, Украина. E-mail: oksana.mikos@bk.ru

Предложена методика оценки триботехнических характеристик контакта на основе создания разной степени проскальзывания, характерной для поверхностей вдоль эвольвентного профиля зубчатых передач. Установлено максимальное изнашивание контактных поверхностей вследствие разрушения граничных смазочных слоев на поверхностях трения, работающих в условиях минимального и максимального проскальзывания. При возрастании степени проскальзывания меняется природа сформированных граничных смазочных шаров, повышается их напряжение сдвига, снижается эффективная вязкость в контакте, характерно приобретение неньютоновских свойств. Рассмотрено влияние граничных пленок на процессы разупрочнения – упрочнения поверхностных слоев металла в взаимосвязи с кинетикой изменения удельной работы трения.

Ключевые слова: граничные слои, реология, износ, микротвердость, удельная работа трения.

ВПЛИВ ЗМІННОГО ГРАДІЄНТУ ШВИДКОСТІ ЗСУВУ НА РЕОЛОГІЧНІ ТА ПРОТИЗНОШУВАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ КОНТАКТУ В РЕЖИМІ ПУСК – ЗУПИНКА

О. О. Мікосянчик

Національний авіаційний університет

просп. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, 03058, Україна. E-mail: oksana.mikos@bk.ru

Запропоновано методику оцінки триботехнічних характеристик контакту на основі створення різного ступеня проковзування, що характерно для поверхонь вздовж евольвентного профілю зубчастих передач. Встановлено максимальне зношування контактних поверхонь внаслідок руйнування граничних змащувальних шарів на поверхнях тертя, які працюють в умовах мінімального та максимального проковзування. Із зростанням ступеня проковзування змінюється природа сформованих граничних змащувальних шарів, підвищується їх напруга зсуву, знижується ефективна в'язкість в контакті, характерно надбання неньютонівських властивостей. Розглянуто вплив граничних плівок на процеси розміцнення – зміцнення поверхневих шарів металу у взаємозв'язку з кінетикою зміни питомої роботи тертя.

Ключові слова: граничні шари, реологія, знос, микротвердість, питома робота тертя.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Причиной неравномерного износа эвольвентных зубчатых передач является непостоянство условий трения для всех точек контактирующих поверхностей вдоль эвольвентного профиля. Поверхностные слои в процессе эксплуатации зубчатых колес разрушаются в результате циклического действия изгибающих напряжений и изнашивания от проскальзывания контактирующих поверхностей по линии зацепления к вершине (корню) зуба. [1]. В полюсной зоне, в условиях качения, при принятых предпосылках износа зубьев не должно быть [2]. Однако, в работах [3, 4] проведен анализ эволюции плоского эвольвентного зацепления при износе от истирания, на основании которого установлено, что контакт заплослых участков сопровождается дрейфом полюса в зацеплении изношенного профиля, что приводит также к износу и в околополюсной зоне. Износ полюсной и околополюсной зоны в зависимости от твердости материала, контактных нагрузок и скорости рассмотрен в работе [5], о наличии пластических деформаций в указанных зонах вследствие искажения эвольвентного профиля при износе можно судить по высокой степени наклепа материала [2].

В условиях трения без смазки, в силу особенностей сложного напряженного состояния поверхностных слоев металла при одновременном действии нормальных и тангенциальных напряжений, деформация поверхностных слоев идет преимущественно

в направлении действия тангенциальных сил, что приводит к текстурированию поверхностных слоев, упрочнению и наклепу [6, 7]. При использовании в качестве смазочного материала для средне- и высоконагруженных зубчатых передач трансмиссионных масел с активными компонентами противоизносных и противозадирных присадок, существенно изменяются механо-химические свойства трибоконтакта. Адсорбированная пленка изменяет поверхностную энергию основного материала. Первичный процесс пластифицирования материала при адсорбции поверхностно-активных веществ заканчивается стадией значительного упрочнения поверхностного слоя металла [8]. Упрочнение поверхностного слоя в активной смазочной среде оказывает экранирующее действие для распространения вглубь металла пластической деформации [9]. В работе [10] установлена взаимосвязь между переходом пластической деформации, обуславливающей интенсификацию износа, к упругой, характеризующейся минимальным износом, и этапами формирования защитных прочных граничных смазочных слоев.

Опыт эксплуатации зубчатых передач показывает, что контактная выносливость поверхностей зубьев зависит от толщины смазочных слоев, которые, в свою очередь, влияют на силы трения и напряженное состояние в контакте [11]. Особые механические и реологические свойства граничных слоев свидетельствуют о формировании в результате

структурної приспособляемості квазикристаллического твердого тела, обладающего упругими и неньютоновскими свойствами [12, 13]. В процессе трения, под действием нормальных и тангенциальных усилий, важно установить закономерности изменения свойств граничных слоев, влияющих на поверхность металла, в плане прогнозирования износостойкости контактных поверхностей.

Целью работы является определение влияния степени проскальзывания контактных поверхностей на триботехнические характеристики контакта в нестационарных условиях трения.

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

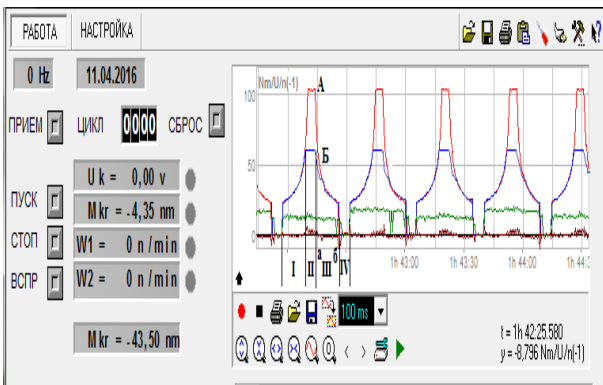


Рисунок 1 – Схема работы трибосистемы в нестационарных условиях трения: участок I – запуск; участок II – стационарная работа; участок III – торможение; участок IV – остановка

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 (IIIа). Дальнейшее торможение происходит в условиях одновременного уменьшения скорости качения обоих роликов при сохранении условия $V_{ск}=0$ (IIIб). Участок IV соответствует остановке. Если спроецировать выбранный цикл на зубчатое эвольвентное зацепление, то полюсная зона зацепления соответствует участкам I и IIIб, околополюсная зона – участку IIIа, крайние точки зацепления с максимальным проскальзыванием – участку II.

Общее количество циклов в каждом эксперименте составило 500. 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 0,35 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 – 20⁰С.

Толщина смазочных слоев измерялась методом падения напряжения в режиме нормального тлеющего разряда, износ образцов и микротвердость поверхностных слоев измерялись на приборе ПМТ-3.

В первоначальный период запуска цикла, который происходит в условиях чистого качения, исследуемое масло характеризуется эффективными смазывающими свойствами – сформированная толщина смазочной плёнки в первые 0–2 с составляет 3–6 мкм.

Согласно расчетному критерию режима смазочного действия λ , в контакте реализуется гидродинамический режим смазки (рис. 2), который обеспечивает надёжное разделение контактных поверхностей при страгивании. Это подтверждается низкими показателями коэффициента трения, составляющими 0,005–0,01 (рис. 3). В период приработки продолжительностью, в среднем 120 циклов, коэффициент трения для контактных поверхностей, работающих в дальнейшем с разной степенью проскальзывания, стабилизируется на уровне 0,005–0,007. Однако при последующей наработке наблюдается ухудшение антифрикционных свойств, характеризующееся повышением коэффициента трения в 1,8–2 раза для поверхностей, работающих на стационарном участке цикла с минимальным проскальзыванием 3 % и максимальным проскальзыванием 40 %.

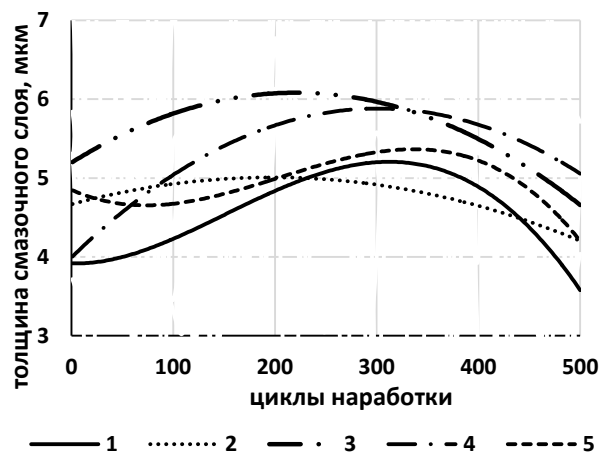


Рисунок 2 – Кинетика изменения толщины смазочного слоя при наработке в первоначальный момент запуска для пар трения с дальнейшим проскальзыванием 3 % (1), 10 % (2), 20 % (3), 30 % (4), 40 % (5)

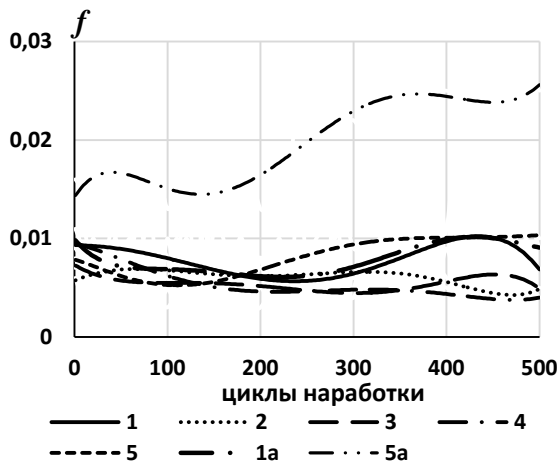


Рисунок 3 – Изменение коэффициента трения (f) при пускена участке I (для пар трения с дальнейшим проскальзыванием 3 % (1), 10 % (2), 20 % (3), 30 % (4), 40 % (5)) и в период стационарной работы на участке II (1а – проскальзывание 3 %, 5а – проскальзывание 40 %)

В процессе приработки происходит структурная приспособляемость контактирующих поверхностей и смазочного материала, вследствие чего реализуется динамическое равновесие процессов образования и разрушения вторичных структур, граничных плёнок смазочного материала. Структурная приспособляемость связана с образованием устойчивой диссипативной структуры переноса энергии и вещества внешней среды в систему трения. Поэтому установление взаимосвязи между изменением энергетических и триботехнических характеристик контакта является важным этапом, на котором возможно прогнозирование эксплуатационных свойств исследуемых материалов.

Анализ изменения удельной работы трения в контакте в период запуска в условиях качения выявил цикличность возрастания этого показателя, которая зависит от кинетики образования и деструкции граничных смазочных слоёв, образованных на активированных трением контактных поверхностях (рис. 4).

Следует отметить, что увеличение удельной работы трения, на 90 % совпадает с началом возрастания толщины граничных смазочных плёнок. Например, из представленных зависимостей на рис. 4, характерно наименьшее приращение удельной работы трения в период запуска, которое составляет от 5 до 30 Дж/мм² в 20 % циклов для пар трения, работающих при дальнейшем проскальзывании 20 %. Именно для этих контактных поверхностей установлена наибольшая толщина граничных смазочных слоёв, составляющая от 0,5 до 3 мкм, кинетику формирования которой в зависимости от N циклов наработки, можно представить уравнением полиномиальной регрессии 4-й степени:

$$h_{\text{гран.}} = 1,55 + 0,0111 \cdot N - 3 \cdot 10^{-5} N^2 - 10 \cdot N^3 + 9 \cdot 10^{-11} N^4.$$

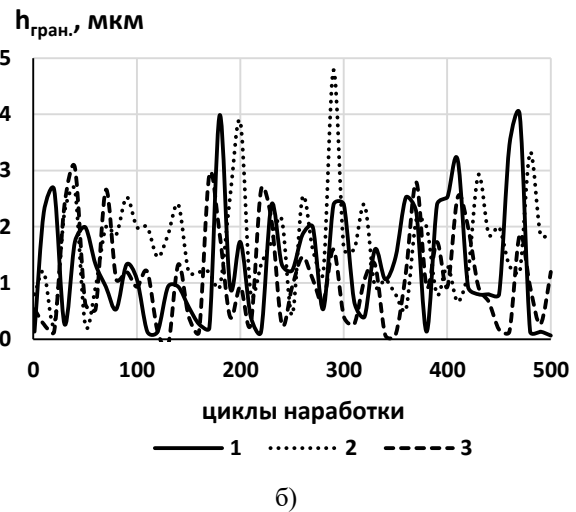
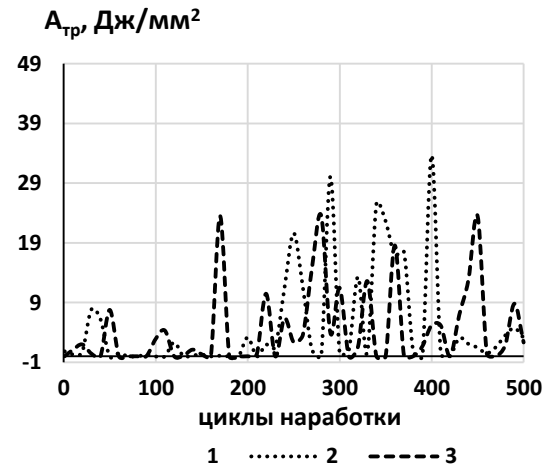


Рисунок 4 – Кинетика изменения удельной работы трения (а) при запуске и толщины граничных смазочных слоев (б) на стоянке для поверхностей при проскальзывании 3 % (1), 20 % (2), 40 % (3)

Для контактных поверхностей, работающих на этапе стационарной работы цикла с 40 %-ным проскальзыванием в период запуска, установлено аналогичное приращение удельной работы трения, однако возрастание этого показателя характерно для 70% циклов наработки. Повышение энергетических показателей в данном случае обусловлено частым истиранием граничных смазочных плёнок, приводящим к непосредственному металлическому контакту пар трения на стоянке. Для данных контактных поверхностей установлены наименьшие значения толщины сформированных граничных плёнок, а кинетика их формирования при наработке описывается следующим уравнением полиномиальной регрессии:

$$h_{\text{гран.}} = 0,8061 + 0,0124 \cdot N - 0,0001 \cdot N^2 + 4 \cdot 10^{-7} \cdot N^3 - 4 \cdot 10^{-10} N^4.$$

Следует отметить экспериментально установленное максимальное приращение удельной работы трения в первоначальный период запуска контактных поверхностей, которые работают с последую-

щим 3 %-ним проскальзиванням. Показатели $A_{тр}$ составляют от 7 до 40 Дж/мм² в 85 % циклов наработки. Непосредственный металлический контакт поверхностей вследствие разрушения граничных слоёв на стоянке обнаружен в 20 % циклов. Толщина сформированных граничных плёнок колеблется от 0,03 до 3 мкм, а динамика их образования представлена следующим уравнением:

$$h_{гран.} = 1,468 - 0,0053 \cdot N - 5 \cdot 10^{-6} \cdot N^2 + 2 \cdot 10^{-7} \cdot N^3 - 3 \cdot 10^{-10} \cdot N^4.$$

Мы полагаем, что нестационарность процессов трения и периодическая смена скоростного параметра существенно влияют на проявление смазочной эффективности исследуемого трансмиссионного масла, поскольку в контакте происходит постоянная циклическая смена режимов смазки. В период остановки происходит выдавливание смазочного материала из зоны контакта под действием приложенной нагрузки, и эффективность разделения контактных поверхностей обусловлена механическими (реологическими) и поверхностными (адсорбционными) свойствами граничных смазочных слоёв. Увеличение скоростного параметра обеспечивает приращение толщины смазочного слоя и формирование гидродинамической составляющей смазочной плёнки. Последующее уменьшение скорости качения вновь приводит к ослаблению влияния гидродинамических эффектов и утонению смазочного слоя.

В наибольшей степени подвержены разрушению граничные слои, сформированные на контактных поверхностях, работающих в условиях минимального и максимального проскальзывания. При этом, основополагающим фактором оценки устойчивости граничной плёнки к динамическим условиям нагружения является установление природы сформированного полимолекулярного граничного слоя. На контактных поверхностях с проскальзыванием до 3% формируются преимущественно граничные слои за счёт физической адсорбции компонентов смазочных материалов, которая характеризуется наличием слабого Ван-дер-Ваальсового взаимодействия. Такие слои нестабильны, подвержены десорбции и дезориентации под действием касательных сдвиговых напряжений. Вследствие этого происходит возрастание коэффициента трения в 2 раза с 120-го цикла наработки и сильные колебания эффективной вязкости в контакте (от 400 до 3500 Па·с) в период пуска (рис. 3, 5).

Резкое увеличение $\eta_{эф}$ свидетельствует о структуризации компонентов смазочного материала на поверхности металла при формировании граничного смазочного слоя. В то же время, при 3 %-ном проскальзывании на стационарном участке работы увеличение градиента скорости сдвига до $(0,6 - 3,5)10^4 \text{ c}^{-1}$ обуславливает снижение эффективной вязкости в контакте до 300 – 700 Па·с, несмотря на 25 %-ное повышение толщины смазочного слоя.

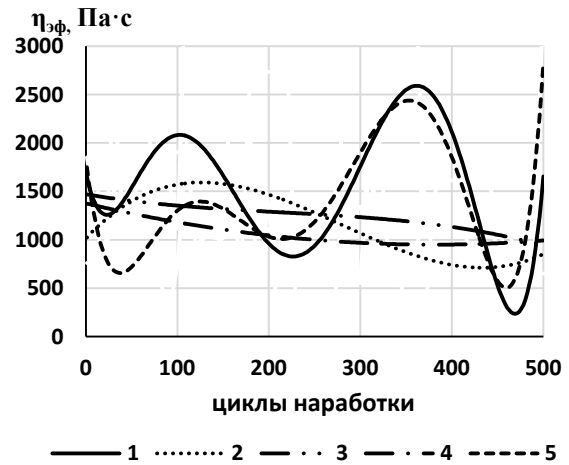


Рисунок 5 – Эффективная вязкость трансмиссионного масла в контакте в пусковой период при работе пар трения с дальнейшим проскальзыванием 3 % (1), 10 % (2), 20 % (3), 30 % (4), 40 % (5)

Напряжения сдвига масляной плёнки с увеличением её толщины локализуются в объёмной фазе, где влияние силового поля активированной поверхности трения значительно ослабляется, следовательно, прогнозируется уменьшение τ . Однако, анализ касательных напряжений сдвига смазочных слоёв в период пуска, при минимальном приращении гидродинамической составляющей толщины смазочного слоя в контакте, и в период стационарной работы, при полностью сформированном смазочном слое, показал, что изменения данного параметра не происходит, расчетные показатели τ находятся в пределах 5–8 МПа (рис. 6).

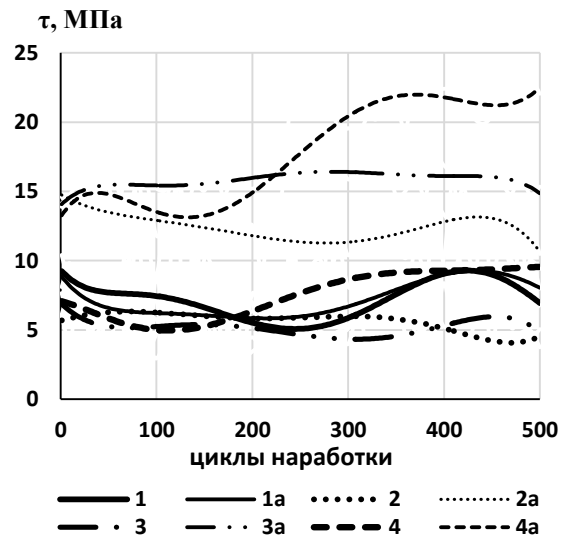


Рисунок 6 – Изменение напряжения сдвига смазочных слоев при пуске на участке I (1, 2, 3, 4) и на участке II при работе пар трения с проскальзыванием 3 % (1a), 10 % (2a), 20 % (3a), 40 % (4a)

Следовательно, сопротивление полимолекулярных граничных слоёв касательным напряжениям при возрастании градиента скорости сдвига минимально, поскольку толщина граничной плёнки составляет в разных циклах наработки от 0,5 до 50 % общей толщины несущего смазочного слоя на стационарном участке работы. Таким образом, установленная идентичность напряжений сдвига граничных слоёв и объемной фазы масла позволяет утверждать о сохранении смазочным материалом свойств ньютоновской жидкости благодаря образованию слабых адгезионных сил взаимодействия физической природы между молекулами смазочного материала и металлической поверхностью.

При увеличении степени проскальзывания на стационарном участке работы от 10 до 30 % установлен иной механизм формирования и разрушения граничных смазочных слоёв. На активированных трением контактных поверхностях происходит формирование граничных слоёв, которые характеризуются наличием прочных химических связей между компонентами смазочного материала и поверхностным слоем металла. Высокая адаптационная способность хемосорбционных плёнок к динамическим условиям нагружения проявляется в стабилизации напряжений сдвига смазочных слоёв в пусковой период, что повышает антифрикционные свойства контакта – f составляет 0,0045–0,006 (рис. 3). Толщина граничных плёнок составляет в среднем 2,3:1,6:1 мкм, соответственно для контактных поверхностей, работающих при проскальзывании 10, 20 и 30%.

Об идентичности природы сформированных хемосорбционных плёнок на поверхностях с разной степенью проскальзывания свидетельствует одинаковая кинетика изменения следующих реологических характеристик. В период пуска, в условиях чистого качения, для исследуемых пар трения напряжение сдвига полимолекулярных граничных слоёв составляет 4–6 МПа, эффективная вязкость в контакте зависит от степени истирания граничных слоёв и колеблется в пределах 600–1500 Па·с (рис. 5).

На участке стационарной работы в период проскальзывания установлено резкое падение эффективной вязкости в контакте до 100–250 Па·с вследствие появления высоких градиентов скорости сдвига порядка $(5-7) \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ для 10 %-ного проскальзывания и $(1-1,3) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ для 20 и 30 %-ного проскальзывания. Так как градиент сдвига смазочных слоёв затрагивает гидродинамическую и негидродинамическую составляющую толщины неоднородной смазочной плёнки, то повышается сопротивление хемосорбционных плёнок их истиранию, что проявляется в повышении напряжений сдвига смазочных слоёв. Для 10, 20 и 30 %-ного проскальзывания повышение τ составило соответственно 2,1:3:3,1 раза (рис. 6). Несоответствие стремительного падения эффективной вязкости в контакте и одновременного повышения напряжения сдвига смазочного слоя свидетельствует о неьютоновских свойствах сформированных хемосорбционных плёнок, для работы которых характерно структурирование и переход в

вязкопластическое состояние. Именно эти слои характеризуются высокими противоизносными и антифрикционными свойствами. Безусловно, по сравнению с минимальным 3 %-ным проскальзыванием, коэффициент трения при увеличении проскальзывания до 10–30 % повышается в 2,5–3 раза. Однако это повышение, на наш взгляд, связано с сопротивлением истиранию хемосорбционных граничных слоёв с сильными когезионными и адгезионными связями. Подтверждением этому служит кинетика изменения удельной работы трения: увеличение данного параметра на участке II при проскальзывании установлено в 200–300 раз, по сравнению с запуском в условиях чистого качения на участке I. Полученные результаты согласуются с исследованиями [14], в которых экспериментально установлено повышение удельной работы молекулярной составляющей силы трения для упорядоченных твердокристаллических слоёв ПАВ при их структуризации на поверхности металла.

На наш взгляд эффективность работы трибосопрежения определяется, безусловно, смазочной способностью масла и антифрикционными характеристиками контакта, однако, решающим критерием оценки должна являться износостойкость пар трения. Суммарный износ опережающей и отстающей поверхностей снижается в 2:1,68:1,53 раза при проскальзывании 10, 20 и 30 % соответственно, по сравнению с износом пар трения при минимальном 3 %-ном проскальзывании (рис. 7).

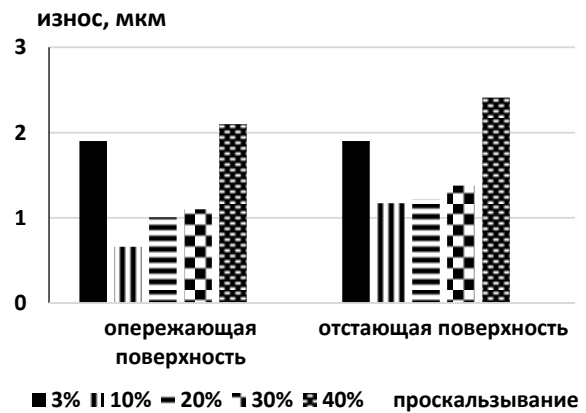


Рисунок 7 – Износ контактных поверхностей в нестационарных условиях работы

Одним из основных механизмов повышения износостойкости с возрастанием степени проскальзывания, на наш взгляд, является смена природы граничных слоёв на активированных трением контактных поверхностях. При минимальном проскальзывании, как указывалось выше, на поверхности металла формируются преимущественно адсорбционные слои физической природы. Согласно эффекту Ребиндера, адсорбция ПАВ обеспечивает пластифицирование поверхностных слоёв металла. Прежде всего это проявляется в снижении микротвёрдости поверхностных слоёв металла для опережающей и отстающей поверхностей соответственно на 500 и 350 МПа при 500 циклах наработки. Постепенное разупрочнение металла свидетельствует об отсут-

вии надёжного экранирования поверхностно-активными компонентами смазочной среды контактных поверхностей, которое проявлялось бы в их последующем упрочнении. Поэтому происходит распространение пластической деформации вглубь металла. На участке проскальзывания установлено самое минимальное приращение удельной работы трения, в среднем, в 13-15 раз, для этих контактных поверхностей, по сравнению с другими исследуемыми парами трения (рис. 8). Это косвенно подтверждает снижение сопротивления поверхностных слоев металла касательным напряжениям вследствие понижения их прочности при пластифицировании, что приводит к интенсификации износа.

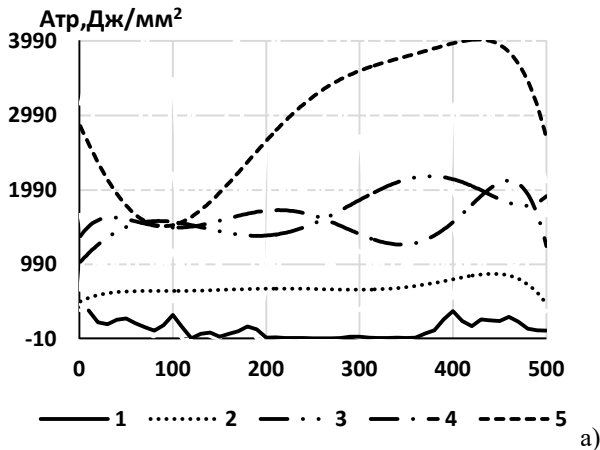


Рисунок 8 – Кинетика изменения удельной работы трения на участке II при проскальзывании 3 % (1), 10 % (2), 20 % (3), 30 % (4), 40 % (5)(а) и приращение $A_{тр}$ в условиях проскальзывания относительно чистого качения (б)

С увеличением степени проскальзывания до 10-30 % при наработке 150–250 циклов также установлено разупрочнение поверхностных слоев металла до 200–250 МПа за счёт понижения их прочности при адсорбции активных серо- и фосфорсодержащих компонентов противоизносной присадки исследуемого трансмиссионного масла. Стойкие к динамическим условиям нагружения граничные слои характеризуются высокими экранирующими свойствами, предотвращая поверхностное разрушение металла в результате механохимических реакций. Подтверждением этому является повышение удельной работы трения в 330 – 400 раз на участке II при наличии проскальзывания (рис. 8) и постепенное увеличение микротвер-

дости поверхностных слоев металла до исходных значений (при проскальзывании 10 и 20 %) либо до превышения исходных показателей на 200МПа (при проскальзывании 30 %). Таким образом, повышение энергонапряженности контакта в этом случае способствует образованию упрочнённого поверхностного слоя металла, который характеризуется повышенной износостойкостью.

Особого внимания заслуживает экспериментально установленное снижение износостойкости контактных поверхностей при увеличении степени проскальзывания на стационарном участке работы до 40 % (рис. 7). Одним из основных механизмов, ведущих к повышенному износу пар трения, является стремительное изменение реологических характеристик смазочного материала. Повышение скорости скольжения при 40%-ном проскальзывании до 1,14 м/с в данных условиях эксперимента обуславливает появление высоких градиентов скорости сдвига смазочных слоев порядка $(1,8 - 3,0) \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Последствием влияния этого параметра на смазочный материал является резкое снижение эффективной вязкости в контакте, в среднем, в 20 раз. При этом, толщина смазочного слоя находится на уровне 5-6 мкм, как и при других исследуемых режимах проскальзывания. В таких условиях трения на этапе приработки длительностью 120 циклов антифрикционные свойства контакта характеризуются высокой эффективностью: f равен 0,015, как и для проскальзывания 10 – 30 %. Это связано с тем, что на контактных поверхностях формируются прочные граничные хемосорбционные пленки. Подтверждением этому служит: отсутствие металлического контакта на стоянке; пластифицирование поверхностных слоев металла, что проявляется в снижении их микротвердости на 200 – 250 МПа; напряжение сдвига смазочных слоев в период пуска аналогично данному параметру для пар трения с меньшей степенью проскальзывания.

Однако, в период с 200 по 300 цикл наработки установлено постепенное увеличение коэффициента трения в 1,7 раз. Такое снижение антифрикционных свойств контакта сохраняется на протяжении всего дальнейшего периода работы (рис. 3). Прежде всего, это связано с неустойчивостью сформированных граничных слоев к высоким градиентам скорости сдвига, что проявляется в увеличении на 44 % напряжения сдвига в смазочном слое вследствие десорбции и дезориентации компонентов смазочного материала в контакте. Подтверждением этому служит кинетика изменения следующих показателей: в 20 % циклов наработки установлен металлический контакт пар трения на стоянке (рис. 4, б); эффективная вязкость в контакте в период пуска колеблется от 900 до 3000 Па·с (рис. 5), что связано с изменением толщины структурированных граничных хемосорбционных слоев в диапазоне от 0 до 2,7 мкм.

Последствием нарушения экранирующих свойств граничных слоев является повышение удельной работы трения в контакте в 580 раз при смене режима качения (участок I) на качение с проскальзыванием (участок II). С 200-го цикла наработки при 40 %-ном проскальзывании на участке II $A_{тр}$ увеличивается в 2,67

раз. Мы полагаем, что возрастание данного параметра обусловлено увеличением степени пластической деформации: установлено сильное упрочнение поверхностных слоев металла – их микротвердость повышается после разупрочнения на 600 и 400 МПа соответственно для отстающей и опережающей поверхностей. Безусловно, в процессе упрочнения значительное влияние имеет и активная смазочная среда, из компонентов которой формируются хемосорбционные пленки. Однако степень упрочнения поверхностных слоев металла при этом режиме работы увеличивается в 2–3 раза, по сравнению с упрочнением при 30 %-ном проскальзывании, где на контактных поверхностях формируются прочные граничные слои смазывающего материала. Поэтому доминирующим фактором, повышающим энергонапряженность контакта при исследуемом максимальном проскальзывании, является пластическая деформация металла, что резко снижает износостойкость контактных поверхностей (рис. 7).

Таким образом, приведенные результаты исследований о влиянии степени проскальзывания на триботехнические характеристики контакта позволяют заключить, что при минимальном проскальзывании 3 % в контакте доминируют процессы, приводящие к пластифицированию поверхностных слоев металла и снижению их износостойкости. Увеличение степени проскальзывания до 10–30 % способствует формированию на поверхностях трения стойких экранирующих хемосорбционных пленок, обеспечивающих их упрочнение и повышение износостойкости. Дальнейшее увеличение проскальзывания до 40 % снижает износостойкость пар трения по причине частой смены формирующихся граничных слоев вследствие их разрушения и усиления степени пластической деформации контактирующих поверхностей.

ВЫВОДЫ. 1. В период запуска циклическое изменение удельной работы трения обусловлено структурной приспособляемостью граничных смазочных шаров, наибольшая степень разрушения которых установлена при работе на стационарном режиме с проскальзыванием 3 и 40 %, что приводит к металлическому контакту пар трения на стоянке.

2. При минимальном проскальзывании для граничных слоев с слабыми физическими Ван-дер-Ваальсовыми силами взаимодействия установлены напряжения сдвига, аналогичные объемной фазе масла, что характерно для ньютоновских жидкостей; увеличение проскальзывания до 10–40 % способствует формированию граничных экранирующих хемосорбционных пленок, характеризующимися свойствами неньютоновских жидкостей.

3. Корреляционное повышение коэффициента трения и удельной работы трения при проскальзывании 10–40 % обусловлено увеличением напряжений сдвига граничных смазочных шаров вследствие их сопротивлению истиранию, десорбции и дезориентации в результате возрастания градиентов скорости сдвига.

4. Первичное влияние активных компонентов трансмиссионного масла на поверхностные слои металла проявляется в снижении их микротвердости в результате пластифицирования. В диапазоне проскальзывания 10–30 % формирование устойчивых

хемосорбционных пленок обеспечивает упрочнение поверхностных слоев металла, что повышает их износостойкость.

ЛИТЕРАТУРА

- Каплун П.В., Гончар В.А. Влияние ионного азотирования на долговечность открытых зубчатых передач // Проблемы трибологии. – Хмельницкий: ХНУ, 2015. – № 2. – С. 84–90.
- Бурдуков А.П., Попов В.И., Фалеев В.А., Юсупов Т.С. Проблема оценки износа сопряжений зубчатых колес транспортных машин и энергетического оборудования // Ползуновский вестник. – Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2010. – № 1. – С. 99–105.
- Prokhorov V.P. Variational and non-variational solution methods of flat engagements optimization problem by friction power criterion // IFToMM-2011, 13th World Congress in Mechanism and Machine Science, Guandjuato, Mexico, June 19–25, 2011, pp. A 9–274. официальный сайт: <http://www.iftomm.org>.
- Эволюция плоского эвольвентного зацепления при износе от истирания / В.П. Прохоров, Г.А. Тимофеев, И.Н. Чернышѐва // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – № 2 [659]. – С. 14–21.
- M. Ognjanovic. Progressive Gear Teeth Wear and Failure Probability Modeling // Tribology in industry. – Journal of the Serbian Tribology Society, 2004. – Volume 26, No. 3&4. – P. 44–49.
- Праведников И.С. Контактное взаимодействие твердых тел с учетом давления, температуры и твердости // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2005. – №1. – URL: http://www.ogbus.ru/autors/Pravednikov/Pravednikov_2pdf.
- Глива В.А. Дослідження структурних змін сплаву АМГ6 за рахунок термічних впливів та пластичної деформації // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 4 (93). – С. 71–75.
- Дмитриченко Н.Ф., Мнацаканов Р.Г., Микоянчик О.А., Куш А.И. Кинетика изнашивания контактных поверхностей при использовании добавки фуллерена C₆₀ к моторному маслу // Трение и износ. – Гомель, ИММС НАН Беларуси, 2009. – № 6 (Т.30). – С. 550–555.
- E.D. Shchukin, E.A. Amelina, V.N. Izmailova et al. Surfactant effects on the residual internal stresses in hydrated mineral binders // Abstracts of the 13-th International Symposium on Surfactants in Solution, Gainesville, Florida, June 11–16, 2000. – pp. 163.
- Ковальский Б.И., Шрам В.Г., Петров О.Н., Сокольников А.Н. Механизм формирования защитного граничного смазочного слоя // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула: ТулГУ, 2014. – Вып. 3. – С. 26–32.
- Жильников Е.П., Самсонов В.Н. Основы триботехники: учеб. для вузов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 136 с.
- Yoshizawa H., You Lung Chen, J. Israelachvili. Fundamental mechanism of interfacial friction. 1. Relation between adhesion and friction // Journal of Physical Chemistry. – 1993. – Vol. 97. – P. 4124–4127.

13. Короткевич С.В., Мартыненко С.М., Кравченко В.В., Парамонов М.В. Самоорганизация смазочных слоев при граничном трении // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель: ГГТУ имени П.О. Сухого, 2004. – № 4 (17). – С.13–16.

14. Воронин С.В., Дунаев А.В. Влияние электрического и магнитного поля на механизм действия присадок к маслам // Трение и износ. – Гомель, ИММС НАН Беларуси, 2015. – Т. 36, № 1 – С.41–49.

INFLUENCE OF THE GRADIENT VARIABLE OF SPEED SHEAR ON THE RHEOLOGICAL AND WEAR CHARACTERISTICS OF THE CONTACT UNDER START – STOP MODE

O. Mikosyanchyk

National Aviation University,

prosp. Kosmonavta Komarova, 1, Kyiv, Ukraine, 03058. E-mail: oksana.mikos@bk.ru

Purpose. To determine the influence of the slip rate of the contact surfaces on the tribological characteristics of the contact under unsteady friction conditions. **Methodology.** Trough proposed method of assessment of lubricants, anti-friction, anti-wear characteristics of the transmission oil start – stop mode with roller cyclic transition in rolling with slip were considered. **Results.** Analysis of the rheological characteristics of the lubricant have identified that, under minimum 3% slip, boundary layers with weak van der Waals physical interaction forces are characterized by the properties of Newtonian fluid, increase in slip up to 10 - 40% promotes the formation of boundary screening chemisorption films, characterized by the properties of non-Newtonian liquids. It has been found that the correlation increase of friction coefficient and specific friction work under 10 - 40% slip is due to increased shear stress of the boundary lubrication shares caused by wear resistance, desorption and disorientation as a result of increasing gradient of shear rate. It has been identified that, under a minimum slip in contact, the dominated processes lead to plasticization of the metal surface layers and reduce their wear resistance. The slip rate increase up to 10 - 30% supports formation of the resistant screening chemisorption film on the friction surfaces that strengthens and increases surface durability. A further slip increase up to 40% reduces wear characteristics of friction pairs resulted by frequent changes of the boundary layers due to their destruction and increased plastic deformation of the contact surfaces. **Originality.** Ability to select different slip degrees in the studied samples allows to project a pilot cycle on involute gearing, which is characterized by the inconstancy of the friction conditions for all points at the contact surfaces along the involute profile. **Practical value.** The results can be applied by experts in the field of design, repair and recover of worn parts at calculating contact durability of gear teeth surface with consideration of lubricant influence. References 15, figures 8.

Key words: boundary layers, rheology, wear, micro-hardness, the specific work of the friction.

REFERENCES

1. Kaplun, P.V., Gonchar, V.A. (2015), "Influence of ion nitriding on the durability of open gears", *Problems of tribology*, no 2, pp. 84–90.

2. Burdukova, A.P., Popov, V.I., Faleev V.A., Yusupov, T.S. (2010), "Problem of wear assessment of the interfaces gears in transport vehicles and power equipment", *Polzunovskiy vestnik*, no 1, pp. 99–105.

3. Prokhorov, V.P. (2011), "Variation and non-variation solution methods of flat engagements optimization problem by friction power criterion", *IFTOMM-2011, 13th World Congress in Mechanism and Machine Science*, Guandjuato, Mexico, June 19–25, 2011, pp. 269–274.

4. Prokhorov, V.P., Timofeev, G.A., Chernysheva, I.N. (2015), "Evolution of flat involute engagement under wear from abrasion", *Higher educational institutions. Mechanical Engineering*, no 2 [659], pp. 14–21.

5. Ognjanovic, M. (2004), "Progressive Gear Teeth Wear and Failure Probability Modeling", *Tribology in industry: Journal of the Serbian Tribology Society*, vol. 26, no 3 & 4, pp. 44–49.

6. Pravednykov, Y.S. (2005), "The Contact interaction of solid parts under pressure, temperature and hardness", *Electronic Journal "Neftegazovoy delo"*, no 1. available at: URL: http://www.ogbus.ru/autors/Pravednikov/Pravednikov_2pdf. (accessed March 28, 2016).

7. Glyva, V. (2015), "Research of structural changes of AMG6 alloy by thermal effects and plastic deformation", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, vol. 93, no. 4, pp. 71–75.

8. Dmitrichenko, N.F., Mnatsakanov, R.G., Mikosyanchik, O.A., and Kushch, A.I. (2009), "Wear

Kinetics of Contact Surfaces with Use of C₆₀ Fullerene Additive to Motor Oil", *Friction and Wear, Gomel, MPRI NASB*, no. 6, vol. 30, pp. 550–555.

9. Shchukin, E.D., Amelina, E.A., Izmailova, V.N. et al. (2000), "Surfactant effects on the residual internal stresses in hydrated mineral binders", *Abstracts of the 13-th International Symposium on Surfactants in Solution*, Gainesville, Florida, June 11–16, 2000, pp. 163.

10. Kowalski, B.I., Scar, V.G., Petrov, O.N., Sokolnikov, A.N. (2014), "The mechanism of formation of the protective boundary lubricating layer", *Proceedings of the TSU. Technical science, Tula State University*, no 3, pp. 26–32.

11. Zhylnekov, E.P., Samsonov V.N. (2012), *Osnovy tribotekhniki: ucheb. dlya vuzov* [Basis of tribotechnics: for high schools], Samara: publishing house of Samara state aerospace university, Samara, Russia.

12. Yoshizawa, H., You Lung Chen, Israelachvili, J. (1993), "Fundamental mechanism of interfacial friction. 1.Relation between adhesion and friction", *Journal of Physical Chemistry*, vol.97, pp. 4124–4127.

13. Kороткевич, С.В. Мартыненко, С.М., Кравченко, В.В., Парамонов, М.В. (2004), "Self-organization of lubrication layers under boundary friction", *Vestnik SGTU named after.P.O.Suhoho*, no. 4 (17), pp. 13–16.

14. Voronin, S.V., Dunayev, A.V.(2015), "Influence of electric and magnetic fields on the mechanism of action of oil additives", *Friction and Wear*, vol. 36, no.1, pp. 41–49.

Стаття надійшла 04.05.2016.