

РЕЖИМЫ ТРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ЧАСТИЧНО РЕГУЛЯРНЫМ  
МИКРОРЕЛЬЕФОМ

Поверхности с частично регулярным микрорельефом (ЧРМР) - это поверхности, на которых различными технологическими способами образуются микроканавки или микроуглубления [1]. Нормирование таких поверхностей выполняется в соответствии с ГОСТ 24773-81. Одним из способов получения поверхностей с ЧРМР является вибронакатывание - образование на поверхности трения сетки микроканавок с помощью сферического индентора методом поверхностного пластического деформирования (ППД).

До настоящего времени было выполнено большое количество исследований поверхностей трения с ЧРМР, в которых отмечается положительное влияние ЧРМР на возникновение полужидкостного и жидкостного трения. Однако поверхности с ЧРМР не нашли такого широкого применения в реальных узлах трения скольжения, как поверхности, обработанные традиционными методами - шлифованием, гладким накатыванием, выглаживанием, суперфинишем или хонингованием. Отчасти это связано с тем, что при вибронакатывании образуются наплывы металла по краям микроканавок, которые, если их не удалить, приводят к повышенному износу поверхностей трения. Кроме этого, в некоторых случаях наблюдается увеличение коэффициента трения при граничном трении и повышенный расход смазочного масла. Промышленное применение поверхностей с ЧРМР тормозится и в результате того, что они более чувствительны к количеству подаваемого в зону трения смазочного материала, чем поверхности без микроканавок, а оптимизация параметров ЧРМР зависит от режима трения - граничное, полужидкостное или жидкостное. Ранее проводившиеся научно-исследовательские работы выполнялись на парах трения, не лишенных погрешностей формы в виде овальности, огранки, отклонения от цилиндричности или погрешностей расположения, таких как отклонение от параллельности осей образца и контрообразца. Все эти погрешности приводят к возникновению дополнительных зазоров между поверхностями трения, в которых находится смазочное масло, и могут нивелировать или исказить эффект смазочного действия микроканавок ЧРМР.

Контроль режима трения и толщины смазочной пленки в зоне трения-наиболее сложная задача в трибоисследованиях. Разделение режима трения на граничную, полужидкостную и жидкостную смазку в экспериментальных исследованиях возможно на основании диаграммы Герси по толщине смазочной пленки; по характеру осциллограмм, полученных при замере электросопротивления смазочной пленки; по величине коэффициента трения.

Диаграмма Герси показывает зависимость коэффициента трения  $f$  от критерия Зоммерфельда, в который входят вязкость смазки  $\eta$ , скорость скольжения  $V$  и давление  $p$  (рис.1).

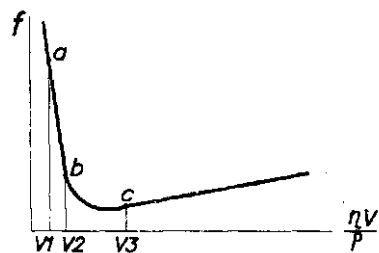


Рис. 1. Области режимов трения на диаграмме Герси при изменении скорости скольжения  $V$ .

Эту диаграмму можно получить, изменяя один из параметров критерия Зоммерфельда. Так, с постепенным увеличением скорости скольжения характер изменения коэффициента трения будет зависеть от режима трения. В большинстве литературных источников принято считать, что участок кривой  $ab$  соответствует граничной смазке, участок  $bc$  - полужидкостной, а участок правее точки  $c$  - жидкостной смазке. Левее точки  $a$

находится область трения без смазочного материала. Ахматов А.С. и Костецкий Б.И. предполагали, что левее точки а существует также область граничной смазки. Этот метод контроля и разделения режима трения весьма приближенный, т.к. положение точек а, b и с неопределенно, особенно точки а, что затрудняет выделение области трения с граничной смазкой.

По толщине смазочной пленки можно условно выделить только граничную смазку. Общепринято, что граничная смазка существует при толщине смазочной пленки менее 0,1 мкм, т.е. когда перестают проявляться объемные свойства смазочного масла. Контроль толщины смазочной пленки такой малой величины практически невозможен из-за огромных погрешностей при таких попытках.

Определение режима трения по характеру осциллограмм возможно при контроле электросопротивления смазочной пленки. В этом случае в электрическую цепь параллельно генератору синусоидального сигнала и измеряемому сопротивлению смазочной пленки включается осциллограф электронный. При граничном трении на экране осциллографа наблюдается прямая линия, при жидкостном - синусоида. При переходных режимах от граничного к жидкостному наблюдаются мерцающие синусоиды и прямые линии.

Определение режима трения по величине коэффициента трения является наименее точным. Д. Мур приводит следующие значения коэффициентов трения: **жидкостная смазка** -  $f = 0,005$ ; **граничная смазка** -  $f = 0,02...0,1$ . По Ахматову А.С. для **граничной смазки**  $f = 0,1...0,4$ ; **рубежный режим гидродинамического трения**  $f = 0,008...0,02$ . Боуден и Тейбор считают, что для граничной смазки характерно изменение коэффициента трения в пределах 0,05...0,1.

Толщина смазочной пленки может контролироваться с помощью электрических, рентгеновских, люминесцентных и оптических методов. Наибольшее распространение получили электрические методы. К ним относятся методы измерения следующих величин: сопротивления смазочной пленки; падения напряжения в смазочном слое; напряжения электрического пробоя; емкости зазора между трущимися поверхностями. Все эти методы пригодны для контроля толщины смазочной пленки при жидкостном трении и дают большие погрешности в режиме граничной смазки.

Для контроля режима трения и измерения электросопротивления смазочной пленки выбран метод, использующий мостовую схему, которая применяется для более точных измерений, чем измерение сопротивления по падению напряжения на нем. Электрическая схема контроля режима трения и электросопротивления смазочной пленки представлена на рис. 2.

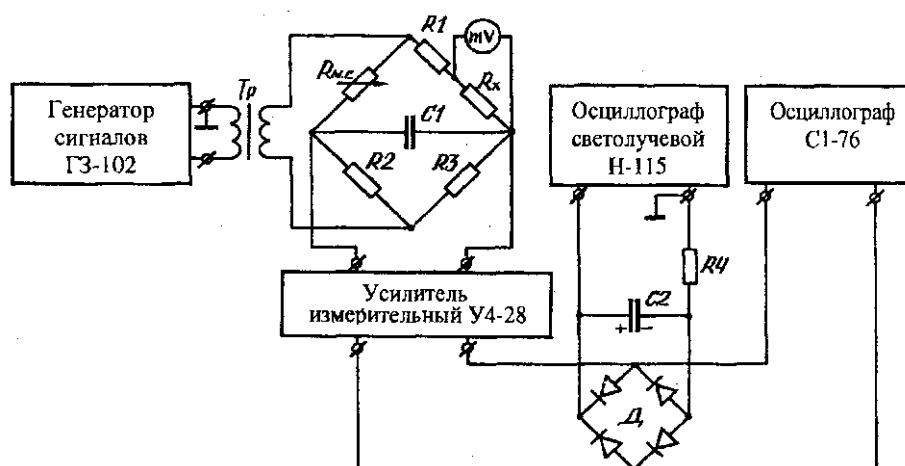


Рис. 2. Электрическая схема контроля режима трения и толщины смазочной пленки.

Во избежание пробоя смазочной пленки напряжение, подаваемое на нее, не превышало 30 мВ. Частота сигнала равнялась 5 кГц, что также снижало вероятность пробоя за счет исключения поляризуемости смазки и позволяло сохранить смазочные свойства масла. Переменное напряжение подавалось от генератора сигналов ГЗ-102 (рис. 2) на трансформатор развязки  $T_r$ , служащий для устранения сетевых помех. Выход трансформатора подключён на мост сопротивлений, где сопротивление смазочной плёнки обозначено  $R_x$ . Сопротивления моста  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  подбирались с точностью до 1%, кроме того, для более точной балансировки в мост включён магазин сопротивлений  $R_{м.с.}$ , позволяющий делать поднастройку до 0,01 Ом.

Контроль режима трения осуществлялся с помощью осциллографа электронного С1-76, который подключался непосредственно к усилителю У4-28, что позволяло наблюдать на экране осциллографа осциллограммы, характерные для граничного, полужидкостного и жидкостного трения.

Толщина смазочной пленки оценивалась по электросопротивлению  $R_x$ , величина которого определялась по осциллограммам, записываемым с помощью осциллографа Н-115. Параллельно записывались значения момента трения и температуры, а в некоторых случаях и показания отметчика оборотов. В плечо моста сопротивлений, наряду с сопротивлением смазочной пленки  $R_x$ , входит сопротивление токосъемного устройства, предназначенного для передачи сигнала от вращающегося образца на клеммы полумоста сопротивлений. От постоянства переходного сопротивления токосъемника зависит баланс моста и точность измерений. К конструкции токосъемного устройства при разработке средств контроля режима трения и толщины смазочной пленки предъявлялись особые требования по величине колебаний переходного сопротивления и по надежности работы, поэтому была разработана конструкция ртутного токосъемного устройства [2].

В данной работе изучались условия возникновения различных режимов трения: граничного, полужидкостного, и жидкостного для поверхностей с ЧРМР. Исследования проводились на парах трения: вал - стальная лента и вал - втулка. Коэффициент трения определялся с помощью прецизионного трибометра [3]. Применение схемы трения вал-лента позволило исключить макроприработку и избежать зазоров в паре трения из-за погрешностей формы и расположения.

В экспериментах применялись шлифованные и доведенные до  $R_a = 0,1$  мкм и с допуском по диаметру 0,005 мм образцы  $d = 30$  мм из стали 45, твердостью НРС 30...32. Часть образцов подвергалась вибронакатыванию с различными режимами обработки для получения образцов с разными параметрами ЧРМР. Угол сетки микроканалов не менялся. Вибронакатанные образцы доводились мелкозернистой шлифовальной шкуркой на жестком вкладыше с целью удаления наплавов по краям микроканалов, образующихся при обработке методом ППД. Образцы, испытываемые в паре с втулками, притирались алмазной пастой совместно с контрообразцами - втулками до  $R_a = 0,1$  мкм. После микроприработки образцов в паре с лентой или втулкой шероховатость рабочих поверхностей равнялась  $R_a = 0,15$  мкм. Зазор в паре трения вал-втулка не превышал 0,01 мм. Погрешности формы образцов не более 3 мкм. При работе по схеме вал-лента в качестве контрообразца применялась стальная лента шириной 32 мм и толщиной 0,06 мм из стали У8. Материал втулок сталь У8.

Все опыты ставились со смазочным маслом Индустриальное - 20. Усилие нагружения образца во всех опытах 0,47 кН, давление номинальное около 0,61 МПа. Коэффициент трения  $f$  и скорость изменения температуры  $\Delta T/\Delta t$  определялись при температуре  $T = (33 \pm 2)$  °С. Температура контролировалась в процессе трения с помощью хромель-копелевой термопары, рабочий спай которой наплавлялся на ленту контрообразца, или заделывался в отверстие втулки. Таким образом, рабочий спай находился на расстоянии 0,06 мм от зоны трения для ленты и около 0,5 мм для втулки. Были проведены две серии экспериментов в зависимости от метода смазывания - при непрерывном капельном и периодическом капельном смазывании.

Результаты исследований образцов с глубиной микроканалов  $h = 7$  мкм и радиусом дна канавки  $r = 1$  мм при непрерывном смазывании представлены на рис. 3.

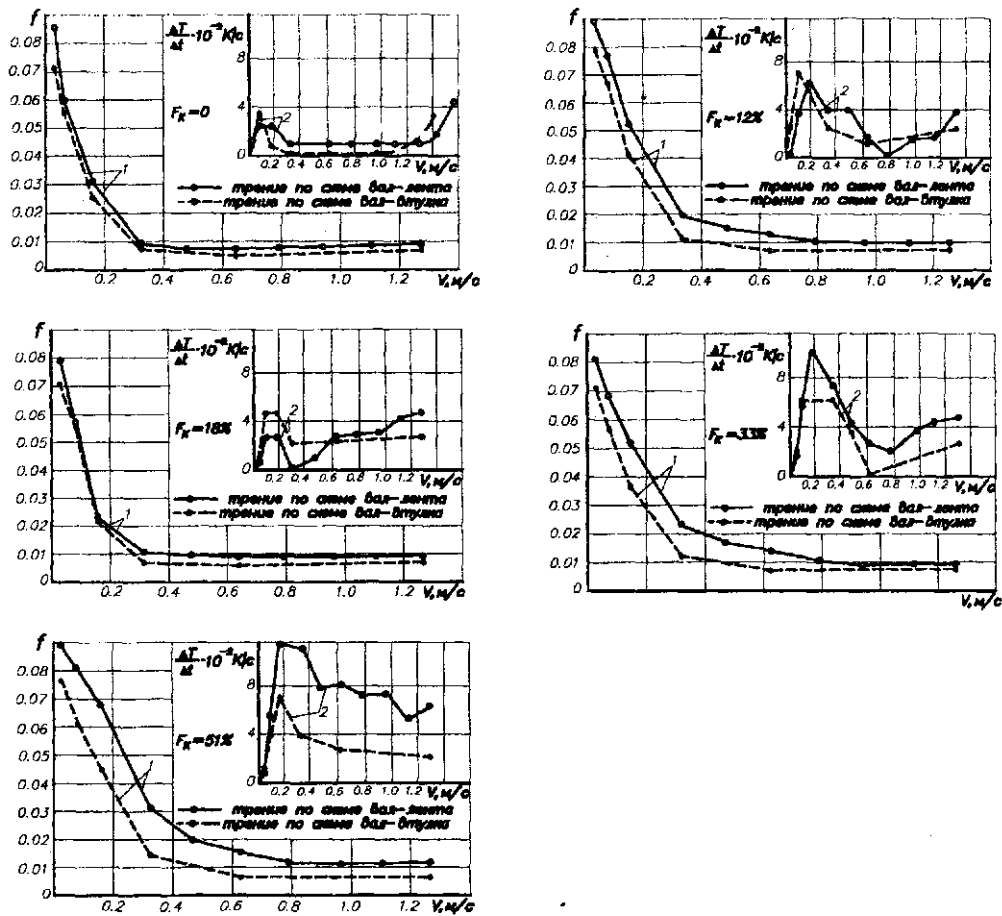


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения  $f$  (1) и скорости изменения температуры  $\Delta T/\Delta t$  (2) от скорости скольжения  $V$  при относительной площади микроканавок  $F_k$  и непрерывном каплевидном смазывании.

Зависимость коэффициента трения  $f$  от скорости скольжения  $V$  имеет характерный вид кривой Герси.

Благодаря замерам скорости изменения температуры  $\Delta T/\Delta t$  стало возможным более точно определить область граничного трения. Это диапазон малых скоростей на начальном участке кривой Герси, на котором с увеличением скорости скольжения  $V$  растет и скорость увеличения температуры  $\Delta T/\Delta t$  (участок А на рис. 4).

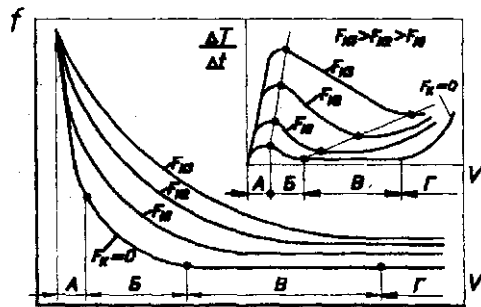


Рис. 4. Границы режимов трения в зависимости от относительной площади микроканавок  $F_k$  и скорости скольжения  $V$ .

Граничная смазка в этом диапазоне скоростей подтверждалась и характером осциллограмм - на экране осциллографа видна прямая слегка мерцающая линия. С увеличением скорости  $V$  и приближением к участку Б (рис. 4) на экране появляются слабые всплески синусоиды. Сопротивление смазочной пленки при граничном трении составляло менее 0,1 Ом и не поддавалось измерению. Диапазон скоростей скольжения, определяющих граничное трение, незначительно зависит от относительной площади микроканавок  $F_k$  и расширяется в сторону увеличения  $V$  при повышении  $F_k$  (рис. 3). При трении по схеме вал-втулка наибольшая скорость граничного

трения немного меньше, чем при трении по схеме вал-лента, т.е. режим полужидкого трения наступает при меньших скоростях скольжения, что является результатом зазоров из-за погрешностей формы и расположения.

Следует обратить внимание, что в области граничной смазки коэффициент трения резко падает с увеличением скорости  $V$ , а скорость повышения температуры  $\Delta T/\Delta t$  – возрастает. Снижение коэффициента трения  $f$  с ростом  $V$  объясняется увеличением толщины смазочной пленки, начиная от монослоя до нескольких слоев, и физико-химическими процессами трения на фактических пятнах контакта [4]. Скорость повышения температуры  $\Delta T/\Delta t$  обусловлена количеством контактов в единицу времени микровыступов на поверхности контробразца с кромками микроканалов на поверхности образца с ЧРМР или с микровыступами на поверхности без микроканалов. Чем выше скорость скольжения  $V$  или чем больше  $F_k$ , тем больше число образующихся адгезионных мостиков сварки в единицу времени, больше энергия взаимодействия микронеровностей с кромками микроканалов и большее количество теплоты выделяется в единицу времени.

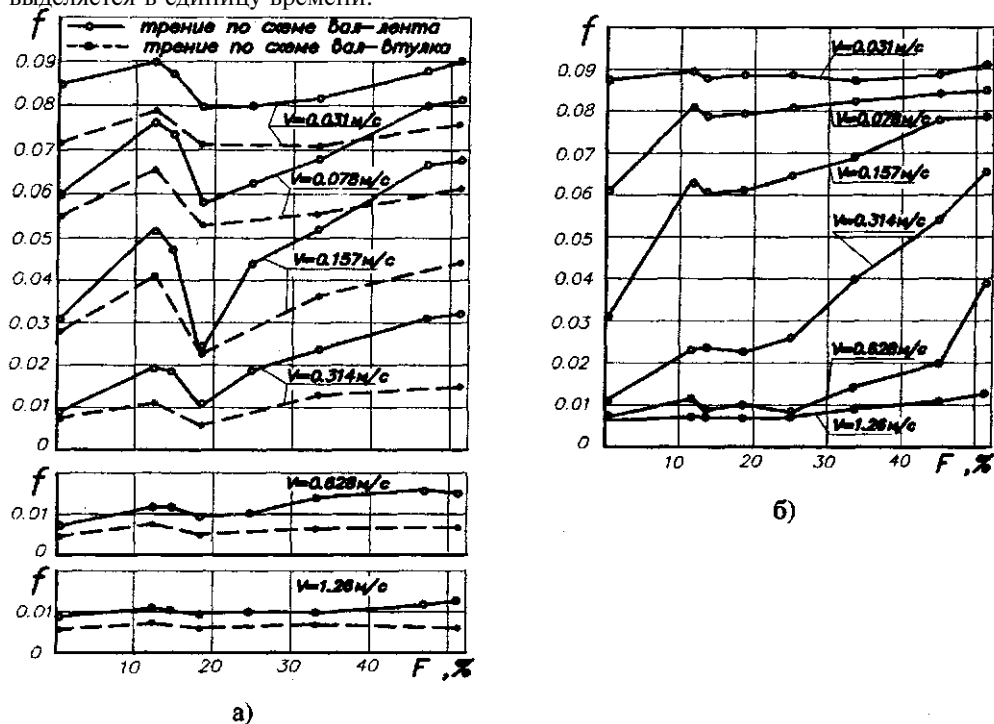


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения  $f$  от относительной площади микроканалов  $F_k$  при непрерывном капельном смазывании а) и при периодическом капельном смазывании б).

Из графиков на рис. 3 видно, что при граничной смазке скорость роста температуры повышается при увеличении  $F_k$ , причем для пары трения вал-лента больше, чем для пары вал-штулка. Исключением является трение с образцом при  $F_k = 18\%$ . На наш взгляд, имеет место увеличение деформационной составляющей коэффициента трения при увеличении  $F_k$  даже при малой шероховатости контробразцов. На образцах с  $F_k = 18\%$  при непрерывном смазывании наблюдается снижение как коэффициента трения, так и скорости роста температуры  $\Delta T/\Delta t$  по сравнению с образцами при  $F_k = 12\%$  или более  $18\%$  (рис.5), но при ограниченной подаче смазочного материала в зону трения  $f$  и  $\Delta T/\Delta t$  выше, чем для образцов без микроканалов ( $F_k = 0$ ) (рис.5). Если смазочное масло подается в зону трения с избытком (непрерывное смазывание), то при  $F_k=18\%$  наблюдается увеличение сопротивления смазочной пленки  $R_x$  и, следовательно, ее толщины даже при малых скоростях  $V=0,08$  м/с (рис. 6).

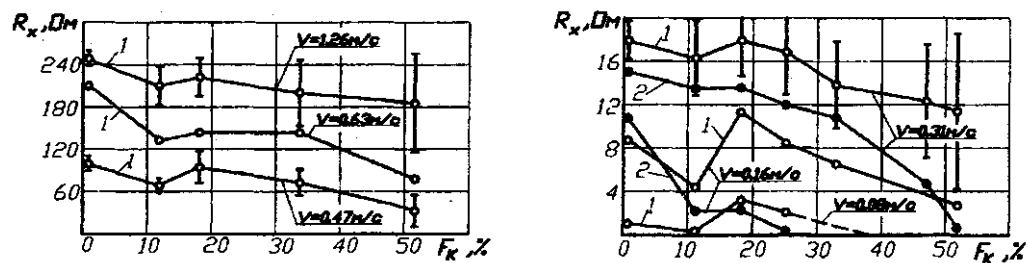


Рис. 6. Зависимость электрического сопротивления смазочной пленки  $R_x$  от относительной площади микроканалов  $F_k$  при непрерывном смазывании (1) и периодическом (2).

На участке Б (рис. 3 и 4) наблюдается снижение коэффициента трения  $f$  и скорости изменения температуры  $\Delta T/\Delta t$ , что связано с дальнейшим ростом толщины смазочной пленки (рис. 7), и в свою очередь ведет к уменьшению количества контактов в единицу времени микровыступов контробразца с кромками микроканалов образца с ЧРМР. На осциллограммах наблюдаются мерцающие синусоиды, что говорит о полужидкостном режиме трения. В этом диапазоне скоростей  $V$  наиболее проявляется минимум коэффициента трения для образцов с  $F_k=18\%$ . Толщина смазочной пленки при  $F_k = 18\%$  выше, чем при других значениях  $F_k$  (рис. 6). С дальнейшим ростом скорости скольжения  $V$  толщина смазочной пленки увеличивается (рис. 7), а с увеличением  $F_k$  уменьшается (рис. 6, 7). Уменьшение толщины пленки с ростом  $F_k$  и  $V$  вызвано началом дренажа смазочного масла из зоны трения по микроканалам.

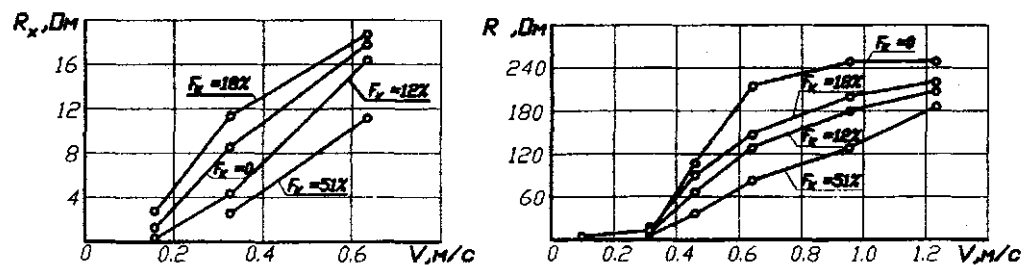


Рис. 7. Зависимость электрического сопротивления смазочной пленки  $R_x$  от скорости скольжения  $V$  при непрерывном смазывании.

Участок В характерен для трения поверхностей без ЧРМР ( $F_k = 0$ ) и поверхностей с  $F_k = 18\%$ . В данном диапазоне скоростей трения скорость изменения температуры  $\Delta T/\Delta t$  остается постоянной, т.е. несмотря на рост скорости  $V$ , количество образующегося в единицу времени тепла не меняется. Причиной данного факта, видимо, является уменьшение числа фактических контактов микронеровностей в единицу времени за счет роста толщины пленки при пропорциональном возрастании энергии взаимодействия микронеровностей и энергии образования и разрыва адгезионных мостиков сварки при повышении скорости  $V$ . Рост толщины смазочной пленки при  $F_k = 0$  и  $F_k = 18\%$  подтверждается графиками (рис. 6, 7). Осциллограммы при трении в диапазоне В имеют вид более приближенный к жидкостному, но металлический контакт между поверхностями трения имеется, о чем свидетельствуют слабые мерцающие линии и размытое изображение синусоиды на экране осциллографа.

На участке Г изменения скорости скольжения наблюдается плавное повышение величины  $\Delta T/\Delta t$  при почти неизменном коэффициенте трения (рис. 3). Увеличение толщины смазочной пленки в этом диапазоне скоростей замедляется. Причем разброс значений  $R_x$  с ростом  $V$  и  $F_k$  увеличивается и доходит до 75% при максимальных  $V$  и  $F_k$ . Основная причина разброса значений  $R_x$  и замедления роста

толщины смазочной пленки - дренаж масла через микроканалы за пределы поверхностей трения. Сильный дренаж и торцевая утечка масла наблюдались как на паре трения вал - лента, так и на паре вал-втулка, хотя при работе с втулкой масло задерживалось в зазорах между втулкой и образцом и в зазорах из-за погрешностей формы и расположения. Именно поэтому коэффициент трения и величина  $\Delta T/\Delta t$  для пары вал-втулка меньше, чем для пары вал-лента, причем эта разница увеличивается с ростом  $F_k$ . В результате дренажа масла не образовывался жидкостной режим, а сохранялся полужидкостным, но более неустойчивым, чем на участке Б и В. Наблюдались лишь отдельные всплески  $R_x$  до 900 Ом, и на мгновения осциллограммы принимали вид, характерный для жидкостного трения. Эти всплески  $R_x$  происходили в момент подачи с избытком свежего смазочного масла во входную зону трения. Рост  $\Delta T/\Delta t$  на участке Г обусловлен большими скоростями трения при незначительной толщине смазочной пленки.

По результатам работы можно сделать следующие **выводы**:

1. Разработанная методика исследований позволяет контролировать режимы трения, особенно благодаря замерам скорости изменения температуры  $\Delta T/\Delta t$ .
2. Для режима граничного трения характерно повышение скорости роста температуры  $\Delta T/\Delta t$  с увеличением скорости скольжения  $V$  и значительное параллельное снижение коэффициента трения  $f$ .
3. При граничном трении может образовываться смазочная пленка разной толщины в зависимости от параметров ЧРМР на образцах и количества подаваемого в зону трения смазочного материала. С уменьшением скорости скольжения толщина пленки уменьшается и становится более стабильной.
4. Сравнительные испытания по схемам трения вал-лента и вал-втулка подтвердили, что наличие зазоров в паре трения из-за погрешностей формы и расположения поверхностей трения изменяет картину механизма трения и смазки.
5. Поверхности трения с нанесенной сеткой микроканалов (ЧРМР) существенно увеличивают дренаж смазочного масла из зоны трения при повышении скорости скольжения  $V$  и относительной площади микроканалов  $F_k$ .
6. На поверхности с ЧРМР существует оптимальная относительная площадь микроканалов  $F_k$ , при которой толщина смазочной пленки возрастает. Это явление почти не наблюдается при граничной смазке и наиболее проявляется при полужидкостном трении и избытке подаваемого в зону трения смазочного масла. Для данных экспериментальных условий оптимальной является  $F_k$  в диапазоне 12%-25% для скоростей  $V$  от 0,1 до 0,3 м/с. При скоростях менее 0,1 м/с и более 0,6 м/с и особенно при недостатке смазочного масла оптимум  $F_k$  исчезает.
7. При трении поверхностей с ЧРМР существенную роль играет деформационная составляющая коэффициента трения, обусловленная контактами микровыступов одной из поверхностей трения с кромками микроуглублений поверхности с ЧРМР.

#### Перечень ссылок

1. Шнейдер ЮТ. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом.-Л.: Машиностроение, 1982 - 248 с.
2. Радионенко А.В. Токосъемник приборов прецизионного контроля состояния смазочной пленки в узлах трения // Измерительная техника - 1988. - №12. -С.20-21
3. Радионенко А.В. Трибометр для исследования влияния качества поверхностей на состояние смазочной пленки // Машиноведение - 1987. - № 6. - С .93-97.
4. Крагельский И.В., Добычин М.П., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ- М.: «Машиностроение», 1977.-526с.

Статья поступила 28.04.2005.