

УДК 621.891

М. В. КИНДРАЧУК<sup>1</sup>, А. В. РАДИОНЕНКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет, Украина

<sup>2</sup>ГВУЗ Приазовский государственный технический университет, Украина

## ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ЧАСТИЧНО РЕГУЛЯРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ

*Изложена методика экспериментов и приведены результаты исследования переходных режимов трения на поверхностях с частично регулярным микрорельефом. Исследования проводились с контролем коэффициента трения, скорости изменения температуры и вида осциллограмм при разных режимах трения. В процессе исследований обнаружен эффект гистерезиса для коэффициента трения.*

**Ключевые слова:** *частично регулярный микрорельеф, режимы трения, коэффициент трения, скорость изменения температуры, гистерезис.*

**Вступление.** 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 микроканалов 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 микроканалов, 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 микроканалов, 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 контробразца. Все эти погрешности приводят к возникновению дополнительных зазоров между поверхностями трения, в которых находится смазочное масло, и могут нивелировать или исказить эффект смазочного действия микроканалов 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.

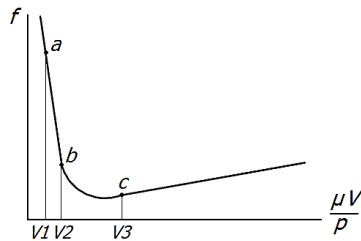


Рис. 1. Области режимов трения на диаграмме Герси при изменении скорости скольжения  $V$

Диаграмма Герси показывает зависимость коэффициента трения  $f$  от критерия Зоммерфельда, в который входят вязкость смазочного масла  $\mu$ , скорость скольжения  $V$  и давление  $p$  (рис.1). Эту диаграмму можно получить, изменяя один из параметров критерия Зоммерфельда.

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  $a$  существует также область граничной смазки. Этот метод контроля и разделения режима трения весьма приближенный, т.к. положение точек  $a$ ,  $b$  и  $c$  неопределенно, особенно точки  $a$ , что затрудняет выделение области трения с граничной смазкой.

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 –  $f = 0,02 \dots 0,1$ . По Ахматову А.С. для граничной смазки  $f = 0,1 \dots 0,4$ , рубежный режим гидродинамического трения  $f = 0,008 \dots 0,02$ . Боуден и Тейбор считают, что для граничной смазки характерно изменение коэффициента трения в пределах  $0,05 \dots 0,1$ .

**Постановка задачи.** 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.

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 1 (рис. 2) на трансформатор развязки 2 ( $T_p$ ), служащий для устранения сетевых помех.

Выход трансформатора подключён на мост сопротивлений 3, где сопротивление смазочной плёнки обозначено  $R_x$ .

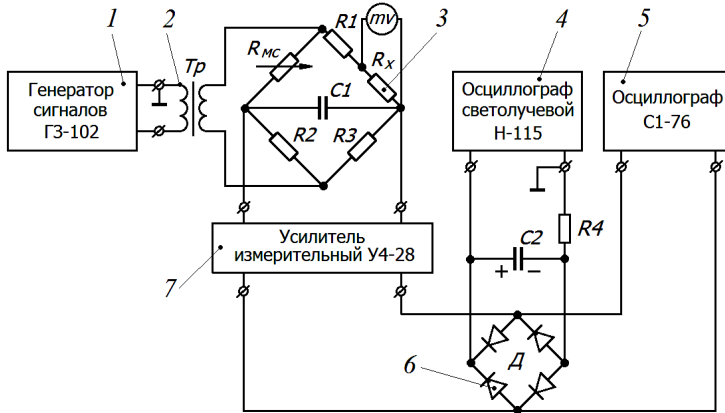


Рис. 2. Электрическая схема контроля режима трения и толщины смазочной пленки: 1 – генератор сигналов ГЗ-102; 2 – трансформатор развязки; 3 – мост сопротивлений; 4 – осциллограф светолучевой Н-115; 5 – осциллограф электронный; 6 – диодный мост; 7 – усилитель измерительный

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  $R_{MC}$ , позволяющий делать поднастройку до 0,01 Ом.

Контроль режима трения осуществлялся с помощью осциллографа электронного 5 (С1-76), который подключался непосредственно к усилителю 7 (У4-28), что позволяло наблюдать на экране осциллографа осциллограммы, характерные для граничного, полужидкостного и жидкостного трения.

Значения момента трения, температуры и показания отметчика оборотов определялись по осциллограммам, записываемым с помощью осциллографа 4 (Н-115).

В плечо моста сопротивлений, наряду с сопротивлением смазочной пленки  $R_X$ , входит сопротивление токосъёмного устройства, предназначенного для передачи сигнала от вращающегося образца на клеммы полумоста сопротивлений. К конструкции токосъёмного устройства при разработке средств контроля режима трения и толщины смазочной пленки предъявлялись особые требования по величине колебаний переходного сопротивления и по надёжности работы, поэтому была разработана конструкция ртутного токосъёмного устройства (рис. 3).

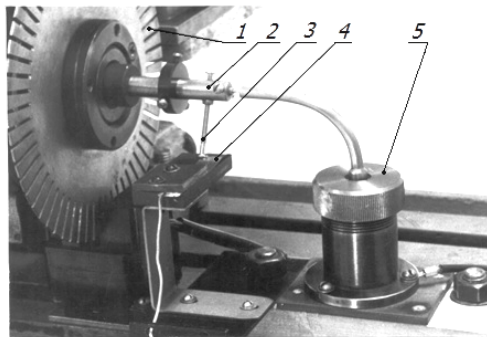


Рис. 3. Отметчик оборотов и токосъёмник: 1 – прерыватель света тахометра; 2 – хвостовик ведущего центра; 3 и 4 – вращающийся и неподвижные контакты отметчика оборотов; 5 – токосъёмник

Созданный ртутный одноканальный токосъемник позволяет измерять электросопротивление в узлах трения скольжения с горизонтальной осью вращения (рис. 3) при длительной работе, обеспечивает надежную защиту от утечки паров ртути и постоянство переходного сопротивления. [2]. Колебания переходного сопротивления при работе с горизонтально расположенным валом, с которого снимался сигнал, не превышали  $1 \cdot 10^{-3}$  Ом. Частота вращения вала доходила до  $33 \text{ с}^{-1}$ .

В данной работе изучались условия возникновения различных режимов трения: граничного, полужидкостного и жидкостного для поверхностей с ЧРМР. Исследования проводились на прецизионном трибометре и паре трения вал-стальная лента (рис. 4) [3].

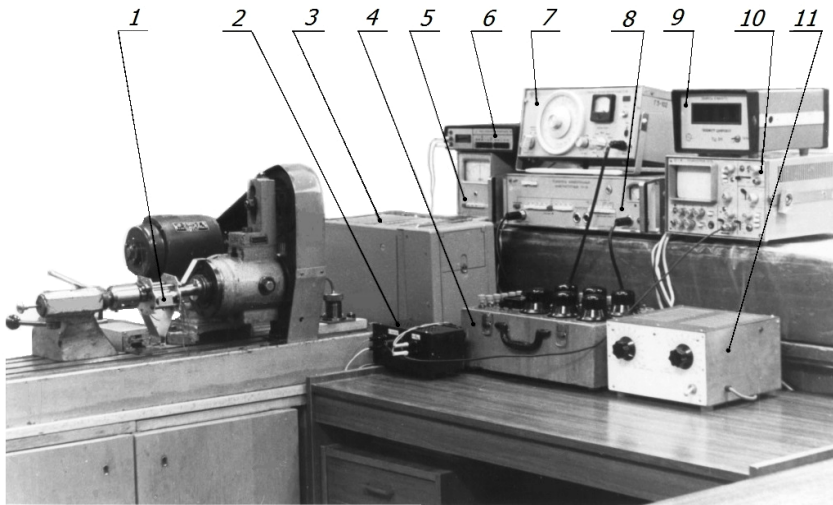


Рис. 4. Установка для лабораторных трибоисследований:

1 – трибометр; 2 – блок с трансформатором развязки, полумостом сопротивлений и диодным мостом; 3 – осциллограф светолучевой Н115; 4 – магазин сопротивлений; 5 – электронный блок индуктивного датчика; 6 – милливольтметр; 7 – генератор сигналов ГЗ-102; 8 – усилитель измерительный УЧ-28; 9 – тахометр цифровой ТЦ-3М; 10 – осциллограф С1-76; 11 – блок управления электроприводом трибометра

Применение схемы трения вал-лента позволило исключить макроприработку и избежать зазоров в паре трения из-за погрешностей формы и расположения. Высокая точность измерения коэффициента трения обеспечивалась также за счет применения высокочувствительного датчика колебаний каретки трибометра и использования передаточного рычага.

В экспериментах применялись шлифованные и доведенные до  $R_a = 0,1 \text{ мкм}$  и с допуском по диаметру  $0,005 \text{ мм}$  образцы  $d = 30 \text{ мм}$  из стали 45, твердостью HRC 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 наплывов по краям микроканалов, образующихся при обработке методом ППД. После микроприработки образцов в паре с лентой шероховатость рабочих поверхностей равнялась  $R_a = 0,15 \text{ мкм}$ . Погрешности формы образцов не более  $3 \text{ мкм}$ . При работе по схеме вал-лента в качестве контрообразца применялась стальная лента шириной  $32 \text{ мм}$  и толщиной  $0,06 \text{ мм}$  из стали У8.

Все опыты ставились со смазочным маслом Индустриальное – 20 при непрерывной подаче масла в зону трения. Усилие нагружения образца во всех опытах 0,47 кН, номинальное давление 0,61 МПа. Температура контролировалась в процессе трения с помощью хромель-копелевой термопары, рабочий спай которой напаивался на ленту контрообразца. Таким образом, рабочий спай находился на расстоянии 0,06 мм от зоны трения.

Измерение момента трения, скорости скольжения, температуры производилось по методике описанной в работе [4]. Коэффициенты трения рассчитывались по формуле, приведенной в [4].

**Результаты исследования.** Результаты исследований образцов с глубиной микроканавок  $h = 7$  мкм и радиусом дна канавки  $r = 1$  мм при непрерывном смазывании представлены на рис. 5.

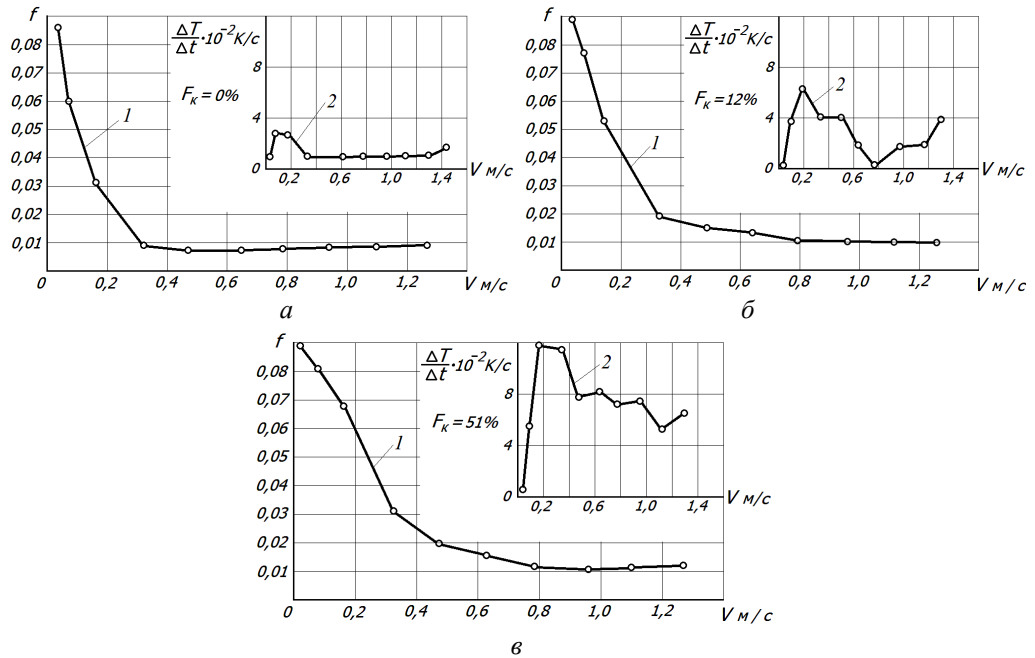


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения  $f$  (1) и скорости изменения температуры  $\Delta T/\Delta t$  (2) от скорости скольжения  $V$  при относительной площади микроканавок  $F_k$ :  
а –  $F_k = 0\%$ ; б –  $F_k = 12\%$ ; в –  $F_k = 51\%$

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. 6).

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. 6) на экране появляются слабые всплески синусоиды (рис. 7, а).

Диапазон скоростей скольжения, определяющих граничное трение, незначительно зависит от относительной площади микроканавок  $F_k$  и расширяется в сторону увеличения  $V$  при повышении  $F_k$ . (участок А на рис. 6).

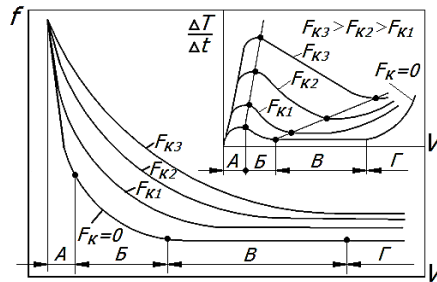


Рис.6. Границы режимов трения в зависимости от относительной площади микроканавок  $F_k$  и скорости скольжения  $V$

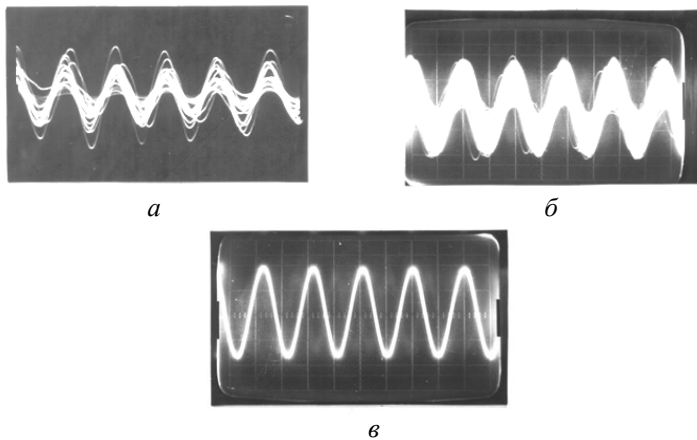


Рис. 7. Осциллограммы режимов трения: *a* – переходной режим от граничной к полужидкостной смазке; *б* – переходной режим от полужидкостной к жидкостной смазке; *в* – жидкостная смазка

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 [5]. Скорость повышения температуры  $\Delta T/\Delta t$  обусловлена количеством контактов в единицу времени микровыступов на поверхности контробразца с кромками микроканавок на поверхности образца с ЧРМР или с микровыступами на поверхности без микроканавок. 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 микроканавок и большее количество теплоты выделяется в единицу времени.

Из графиков на рис. 5 видно, что при граничной смазке скорость роста температуры повышается при увеличении  $F_k$ . На наш взгляд, имеет место увеличение деформационной составляющей коэффициента трения при увеличении  $F_k$  даже при малой шероховатости контробразцов

На участке *B* (рис. 6) наблюдается снижение коэффициента трения  $f$  и скорости изменения температуры  $\Delta T/\Delta t$ , что связано с дальнейшим ростом толщины смазочной пленки, и в свою очередь ведет к уменьшению количества контактов в единицу времени микровыступов контробразца с кромками микроканавок

образца с ЧРМР. На осциллограммах наблюдаются мерцающие синусоиды, что говорит о полужидкостном режиме трения (рис. 7, б).

С дальнейшим ростом скорости скольжения  $V$  толщина смазочной пленки должна увеличиваться, но с увеличением  $F_k$  уменьшается. Фактическое уменьшение толщины пленки с ростом  $F_k$  и  $V$  вызвано началом дренажа смазочного масла из зоны трения по микроканалам.

Участок  $B$  ярко выражен для трения поверхностей без ЧРМР ( $F_k = 0$ ). 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  $F_k = 0$  подтверждается графиками (рис. 5). Осциллограммы при трении в диапазоне  $B$  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  $\Gamma$  при изменении скорости скольжения наблюдается плавное повышение величины  $\Delta T/\Delta t$  при почти неизменном коэффициенте трения (рис. 5). Увеличение толщины смазочной пленки в этом диапазоне скоростей замедляется. Основная причина замедления роста толщины смазочной пленки – интенсивный дренаж масла через микроканалы за пределы поверхностей трения. В результате дренажа масла не образовывался жидкостной режим, а сохранялся полужидкостным, но более неустойчивым, чем на участке  $B$  и  $B$ . Наблюдались лишь отдельные всплески  $R_x$  до 900 Ом, и на мгновения осциллограммы принимали вид, характерный для жидкостного трения (рис. 7, в). Рост  $\Delta T/\Delta t$  на участке  $\Gamma$  обусловлен большими скоростями трения при незначительной толщине смазочной пленки. На возрастание гидродинамического давления указывало то, гибкая стальная лента (контробразец) слегка выгибалась по центру зоны контакта.

**Проявление эффекта гистерезиса.** Гистерезис в триботехнических системах – это физическое явление, которое объясняется необратимыми изменениями, проявляющимися в различном течении прямых и обратных процессов.

При исследовании режимов трения поверхностей с частично регулярным микрорельефом (ЧРМР) был обнаружен эффект гистерезиса для коэффициента трения при изменении вектора скорости скольжения.

Частота вращения образца  $n$  контролировалась цифровым тахометром и могла плавно изменяться от 20 до 2000 об/мин ( $V = 3,14 \times 10^{-2} - 3,14$  м/с).

Были получены кривые (рис. 8) аналогичные диаграмме Герси и участкам  $B$  и  $B$  на рис. 6. Графики на рис. 8 соответствуют переходным режимам от граничной к полужидкостной смазке и от полужидкостной к жидкостной смазке.

При плавном повышении скорости скольжения  $V$  графики зависимости коэффициента трения  $f$  от  $V$  отличаются от графиков при плавном снижении скорости скольжения  $V$  (рис. 8). Коэффициент трения резко снижается до минимума при увеличении частоты вращения образца  $n$ , а в дальнейшем незначительно и плавно возрастает. Интерес представляет участок кривой (рис. 6), где коэффициент трения соответствует минимальному значению, это в соответствии с диаграммой Герси – полужидкостное трение и начало жидкостного.

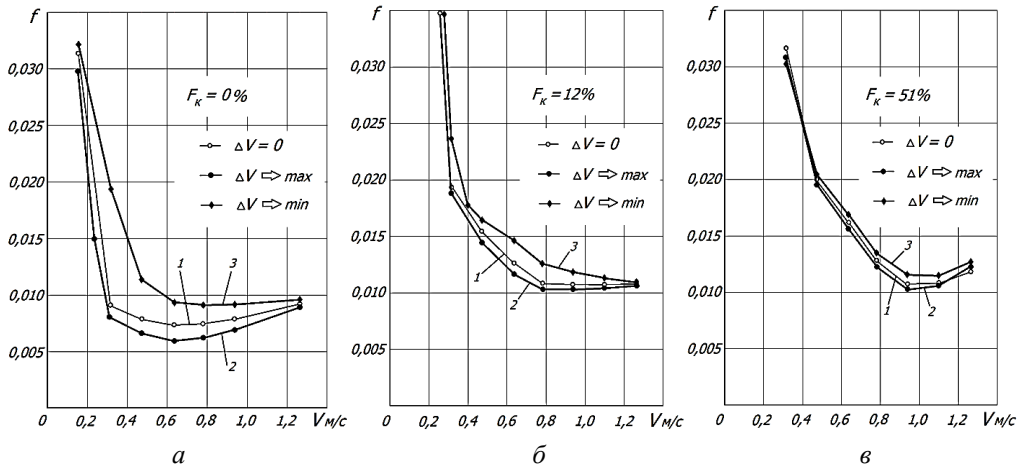


Рис. 8. Зависимость коэффициента трения  $f$  от скорости  $V$ : 1 – при установившемся режиме трения ( $\Delta V = 0$ ); 2 – при плавном повышении скорости скольжения  $V$ ; 3 – при плавном снижении скорости  $V$ . Относительная площадь микроканавок  $F_k$ :

$a - F_k = 0\%$ ;  $b - F_k = 12\%$ ;  $v - F_k = 51\%$

На этом участке обнаружен гистерезис коэффициента трения  $f$ , т.е. при плавном возрастании частоты вращения  $n$  до 900 об/мин и затем, снижении до тех же промежуточных (контрольных) значений  $n$ , образовывалась петля гистерезиса. При увеличении относительной площади микроканавок  $F_k$  коэффициент трения возрастал при тех же значениях  $n$ , и петля гистерезиса смещалась вверх и вправо, т.е. полужидкостное трение возникало при больших частотах вращения образца  $n$  и больших коэффициентах трения. Кроме этого, разница значений  $f$  при одних и тех же  $n$  уменьшалась, т.е. петля гистерезиса сужалась. Минимальное значение  $f$  получено на образцах без микроканавок, т.е. при  $F_k = 0$ .

При анализе зависимостей (рис. 8). видно, что коэффициенты трения при плавном повышении скорости скольжения  $V$  меньше коэффициентов трения, полученных при плавном снижении скорости  $V$  и меньше коэффициентов при установившемся режиме трения, когда  $n$  было зафиксировано ( $\Delta V = 0$ ).

Графики 1 на рис.8 получены во время отдельного эксперимента при стабилизации режима трения, которая происходила при неизменной скорости скольжения  $V$  в течение 10...30 с.

Наиболее отличаются коэффициенты трения для случаев 1, 2, 3 при  $F_k = 0$ , т.е. поверхностей без микроканавок.

Для больших  $F_k$  коэффициенты трения выше и область минимума смещается в сторону увеличения  $V$ .

Достоверное объяснение триботехническому эффекту гистерезиса коэффициента трения на данном этапе исследований пока не найдено. Можно предположить, что гистерезис коэффициента трения при полужидкостном трении и на начальном участке жидкостного трения обусловлен градиентом скорости подачи смазочного материала во входную зону радиального подшипника скольжения. Возрастание коэффициентов трения при увеличении  $F_k$  и сужение петли гистерезиса можно попытаться объяснить повышенным торцевым дренажем смазочного масла за счет микроканавок ЧРМР.



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

1. Разработанная методика исследований позволяет контролировать режимы трения. Из известных способов определения режима трения (граничная смазка, полужидкостная или жидкостная) наиболее приемлемым является способ контроля по характеру осциллограмм наблюдаемых при замере электросопротивления смазочной пленки. Более достоверным можно признать способ определения режима трения по скорости изменения температуры в зоне трения  $\Delta T/\Delta t$  при увеличении скорости скольжения.

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. Поверхности трения с сеткой микроканалов (ЧРМР) существенно увеличивают дренаж смазочного масла из зоны трения при повышении скорости скольжения  $V$  и увеличении относительной площади микроканалов  $F_k$ .

4. 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.

5. Метод смазывания поверхностей трения с ЧРМР оказывает существенное влияние на механизм смазки. На поверхностях с ЧРМР увеличивается торцовая утечка смазочного масла по сравнению с поверхностями без микроуглублений. Смазочное масло устремляется по микроканалам из зоны трения, что при недостаточной подпитке маслом из входной зоны исключает возникновение масляного клина и гидродинамического давления. С увеличением скорости скольжения и площади микроканалов дренаж масла возрастает.

6. Гистерезис коэффициента трения при полужидкостном трении и на начальном участке жидкостного трения обусловлен положительным градиентом скорости подачи смазочного материала во входную зону радиального подшипника скольжения. Возрастание коэффициентов трения при увеличении  $F_k$  и сужение петли гистерезиса можно объяснить повышенным торцевым дренажем смазочного масла за счет микроканалов ЧРМР.

#### Список литературы

1. Шнейдер Ю. Г. 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. The Friction Mechanism Between Surfaces With Regular Micro Grooves Under Boundary Lubrication / M. Kindrachuk [and other] // Aviation. – 2014. – V.18 – № 2. – P.64 – 71.
5. Крагельский И.В., Добычин М.П., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: «Машиностроение», 1977. – 526с.

---

*М. В. КИДРАЧУК, А. В. РАДИОНЕНКО*

### **ОСОБЛИВОСТІ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ З ЧАСТКОВО РЕГУЛЯРНИМ МІКРОРЕЛЬЄФОМ**

Викладена методика експериментів та наведено результати дослідження перехідних режимів тертя на поверхнях з частково регулярним мікрорельєфом. В роботі вивчався вплив мікроканалок на поверхнях з частково регулярним мікрорельєфом (ЧРМР) на виникнення різних режимів тертя – граничне, напіврідинне і рідинне. Дослідження проводилися на прецизійному трибомері з контролем коефіцієнта тертя, швидкості зміни температури і виду осцилограм за різних режимів тертя. В процесі досліджень виявлено ефект гістерезису для коефіцієнта тертя при зміні швидкості ковзання.

**Ключові слова:** частково регулярний мікрорельєф, режими тертя, коефіцієнт тертя, швидкість зміни температури, гістерезис.

*М. V. KINDRACHUK, A. V. RADIONENKO*

### **FEATURES OF TRANSITION MODES OF FRICTION SURFACES WITH PARTIALLY REGULAR MICRORELIEF**

The methodology of experiments and the results of the study of transition modes of friction on surfaces with partially regular micro relief was presented. In this article the influence of micro-groove on the surfaces with partially regular micro-relief (PRMR) upon appearance of various friction modes – boundary, semi-fluid and fluid was investigated. The research was conducted on tribometer with a precision control of the friction coefficient, rate of change of temperature and the type of waveforms under different conditions of friction. The conducted investigation helped to discover the effect of hysteresis for friction coefficient when the sliding speed, was altered.

**Key words:** partially regular micro relief, modes of friction, coefficient of friction, the speed of temperature change, hysteresis.

**Кидрачук Мирослав Васильевич** – д-р. техн. наук, проф., зав. каф. машинобудування, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, г. Київ, Україна, 03058, тел. +38 044 406 77 73. E-mail: Kindrachuk@ukr.net.

**Радионенко Александр Васильевич** – канд. техн. наук, доцент кафедри «технологія машинобудування» ГВУЗ «Приазовський державний технічний університет», г. Маріуполь, ул. Університетська, 7, Україна, 87500, тел.: +38 0629 44 65 89, E-mail: a.v.radionenko@yandex.ru.