

## ТРЕНИЕ И ИЗНОС В МАШИНАХ

УДК 621.892

Н. К. КРИОНИ

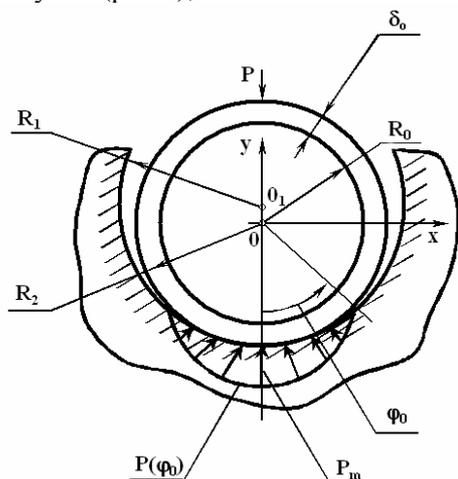
## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТВЕРДЫЕ СМАЗОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ В ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ

Рассматриваются вопросы прогнозирования триботехнических свойств (сил трения, долговечности) реальных подвижных сопряжений, работающих в условиях высоких температур и давлений, на стадии проектирования. В связи с широким использованием твердых смазочных покрытий (ТСП) в распространенных подвижных сопряжениях типа «вал-втулка» актуальной задачей является прогнозирование триботехнических свойств (сил трения, долговечности) в таких сопряжениях, которые работают в условиях высоких температур и удельных нагрузок. *Подшипники скольжения; трение; твердые смазочные покрытия; прогнозирование триботехнических свойств*

### КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ. ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И РАСЧЕТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ

При определении сил трения, возникающих в подшипниках скольжения с ТСП, принимали, что:

- подшипниковый узел состоит из вала с ТСП и втулки (рис.1);



**Рис.1.** Расчетная схема подшипника скольжения с антифрикционным элементом, закрепленным на валу

- площадь контакта, образованная между валом с ТСП и втулкой, под нагрузкой  $N$  равна контурной площади касания, т. е. макроотклонения контактирующих поверхностей пренебрежимо малы;

- в пределах контурной площади контакта

взаимодействие вала с ТСП и втулки происходит в дискретных зонах фактического касания;

- возникающие в зонах фактического касания силы трения имеют молекулярно-механическую природу;

- твердость ТСП намного меньше твердости материалов вала и втулки;

- микронеровности поверхности втулки представляют собой шаровые сегменты одинакового радиуса  $R$ , расположенные с постоянной плотностью на поверхности, а распределение вершин микронеровностей такое, что начальная часть кривой описывается функцией  $t_p = be^v$ ;

- поверхностная и объемная температуры не отличаются;

- возникающие в зонах фактического касания напряжения не будут приводить к нарушению условий внешнего трения.

Величина силы трения, как показывает анализ [1, 2, 3, 4, 5], будет зависеть от вида деформаций в зонах фактического касания.

В работе [5] показано, что для исследуемых материалов при заданной удельной нагрузке в зонах фактического касания контакта будут реализовываться пластические деформации, обусловленные внедрением более жестких контактирующих элементов в менее жесткие. Внедрение происходит вследствие того, что микронеровности твердого тела намного тверже ТСП и относительные сближения велики.

Так как твердость материала, на который нанесено ТСП, намного больше твердости ТСП, то в тех случаях, когда процессы деформации будут сосредоточены в слое ТСП, в зонах фактического касания взаимодействующих тел будут реализо-

вываться и пластические деформации.

Коэффициент внешнего трения в подшипнике скольжения при пластическом ненасыщенном контакте, согласно [6], в зависимости от действующей нагрузки и конструктивно-технологических, материаловедческих и эксплуатационных характеристик равен:

$$f = f_m + f_d = f_m + \frac{0,43\Delta^{0,5}}{HB^{0,25}} \left[ \frac{(P\epsilon_3 E_1^{0,25})}{Rl^{0,25}\xi^{0,5}} \right]^{0,25}, \quad (1)$$

где  $f_m$  – молекулярная составляющая коэффициента трения;  $f_d$  – деформационная составляющая коэффициента трения;  $\Delta$  – комплексная характеристика шероховатости;  $HB$  – твердость материала по Бринеллю;  $P$  – нормальная нагрузка;  $\epsilon_3$  – радиальный зазор в сопряжении вал-втулка;  $R$  – номинальный радиус сопряжения;  $l$  – длина втулки;  $\xi = 1 - \mu_1^2 + (1 - \mu_2^2) \frac{E_1}{E_2}$ ,  $\mu_1$ ,  $\mu_2$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  – ко-

эффициенты Пуассона и модули упругости соответственно материалов вала и втулки.

Известно, что молекулярная составляющая  $f_m$  коэффициента трения существенно зависит от параметров  $\tau_0$  и  $\beta$ , характеризующих физико-химическое состояние поверхностей трения, а также от фактического давления. Деформационная составляющая  $f_d$  коэффициента трения в значительной степени зависит от шероховатости поверхности втулки, давления и физико-механических свойств материалов втулки и вала.

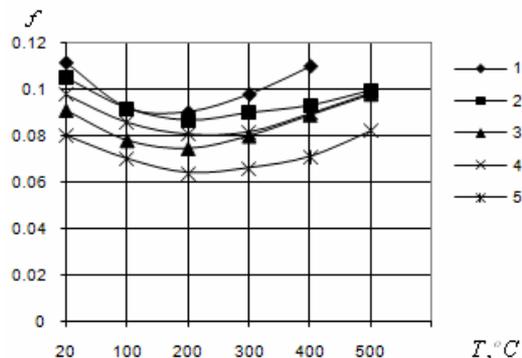
### ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТСП В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Согласно современным представлениям о трении реальных поверхностей [5], молекулярная составляющая коэффициента трения для шероховатой поверхности равна молекулярной составляющей коэффициента трения, определенной для единичного индентора. Деформационная составляющая коэффициента трения шероховатой поверхности определяется по известным микрогеометрическим характеристикам и физико-механическим свойствам. Как было установлено ранее [7], с изменением температуры молекулярная составляющая коэффициента трения, определяемая зависимостью средних касательных и нормальных напряжений от температуры, изменяется по сложной закономерности. Деформационная составляющая коэффициента трения для сопряжения «вал-втулка» с изменением температуры определяется согласно выражению (1). Таким образом, молекулярно-механическая теория внешнего трения определяет коэффициент тре-

ния как сумму двух составляющих, поэтому он с изменением температуры должен изменяться по сложной закономерности, определяемой законами изменения молекулярной и деформационной составляющих коэффициента трения от температуры.

Перед настоящими исследованиями стояли следующие задачи: во-первых, экспериментально исследовать зависимость общего коэффициента трения для подвижного сопряжения «вал с ТСП – втулка» в температурном диапазоне внешнего трения; во-вторых, исходя из результатов установленных ранее закономерностей изменения молекулярной и деформационной составляющих коэффициента трения от температуры, установить справедливость основного уравнения молекулярно-механической теории внешнего трения для пары «вал с ТСП – втулка», т. е. оценить соответствие экспериментально определенных значений коэффициента трения и значений, полученных суммированием молекулярной и деформационной составляющих коэффициента трения. Результаты исследований приведены на рис. 2, 3.

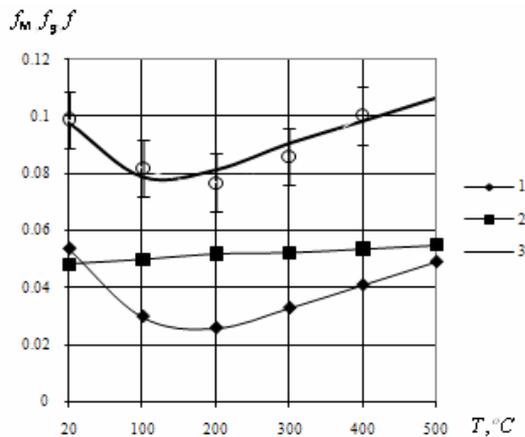
Из рисунков видно, что с повышением температуры от нормальной и выше коэффициент трения уменьшается, проходит через минимум, а затем с той или иной интенсивностью начинает увеличиваться. Повышение коэффициента трения обусловлено резким изменением физико-механических свойств связующего вещества и окислением антифрикционного наполнителя.



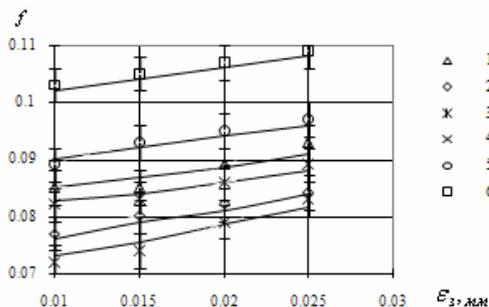
**Рис. 2.** Зависимость коэффициента трения от температуры (1 – вал 1X18H10T, втулка 1X18H10T, покрытие ВНИИНП-229; 2 – вал 1X18H10T, втулка 1X18H10T, покрытие СТС-4; 3 – вал 1X18H10T, втулка 1X18H10T, покрытие ЦВСП-3с; 4 – вал ХН60ВТ, втулка ХН60ВТ, покрытие ВНИИНП-229; 5 – вал ХН60ВТ, втулка ХН60ВТ, покрытие СТС-4)

Характерным для зависимости коэффициента трения от температуры является разброс его экспериментальных значений. Так, при нормальной температуре кривые построены по значениям, определенным с точностью  $\pm(5-11)\%$ . При повышении температуры и понижении коэффици-

ента трения разброс несколько снижается, вплоть до минимума, достигая  $\pm(3-5)\%$ , однако, с повышением коэффициента трения разброс увеличивается. Температурный диапазон исследований ограничивался работоспособностью подвижного сопряжения. Изменение коэффициента трения регистрировалось, начиная с момента страгивания и кончая возникновением задира. Установившееся рабочее значение коэффициента трения сохраняется в течение значительной доли времени работы ТСП – (90–95)%, и непосредственно перед задиром коэффициент трения необратимо растет. Этот процесс по времени составляет 10–18 с.

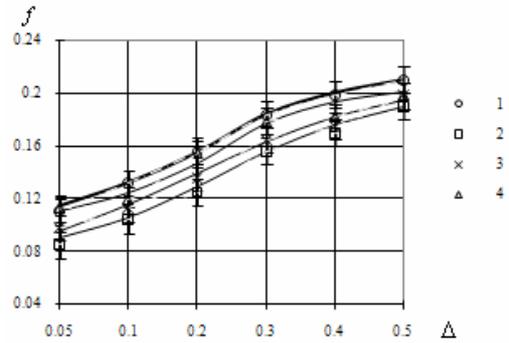


**Рис. 3.** Зависимость коэффициента трения и его составляющих от температуры (вал – 1X18H10T, втулка – ХН55ВМКЮ, покрытие – ВНИИНП-229) составляющие коэффициента трения: 1 – молекулярная; 2 – деформационная; 3 – общий коэффициент трения

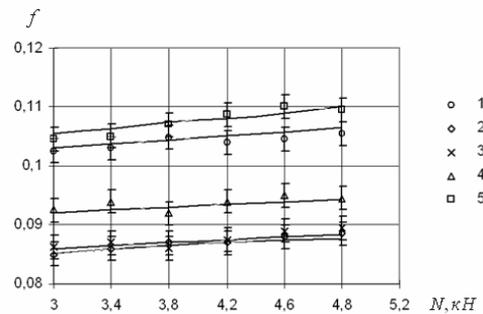


**Рис. 4.** Зависимость коэффициента трения от радиального зазора  $\epsilon_3$  ( $N = 3400\text{H}$ ;  $\Delta = 5,5 \cdot 10^{-2}$ ; покрытие – СТС-4(а); вал – 1X18H10T; втулка – 9X18); 1 – 20°C; 2 – 100°C; 3 – 200°C; 4 – 400°C; 5 – 500°C; 6 – 550°C

Для более полного представления характера зависимости коэффициента трения в сопряжении «вал-втулка» от температуры, эксперименты проводились в широком диапазоне нормальных нагрузок  $N$ , радиальных зазоров  $\epsilon$  и комплексных характеристик шероховатости  $\Delta$ , обеспечивающих условие пластического контакта [5, 6]. По результатам исследований строились зависимости в координатах  $f - N$ ,  $f - \Delta$  и  $f - \epsilon$ . На рис. 4–6 приведены эти зависимости для ряда температур.



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента трения от комплексной характеристики шероховатости  $\Delta$  ( $N = 3400\text{H}$ ;  $\epsilon_3 = 0,02\text{ мм}$ ; покрытие ВНИИНП-229; вал 1X18H10T; втулка 9X18): 1 – 20°C, 2 – 100°C, 3 – 200°C, 4 – 400°C



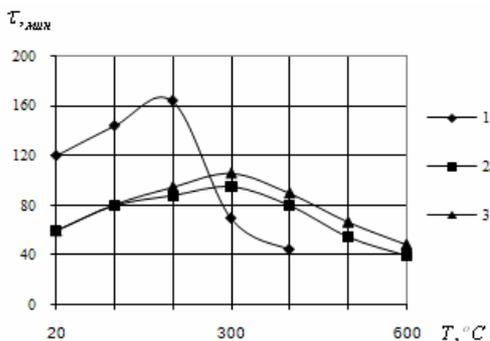
**Рис. 6.** Зависимость коэффициента трения от нормальной нагрузки  $N$  ( $\epsilon_3 = 0,015\text{ мм}$ ;  $\Delta = 5,5 \cdot 10^{-2}$ ; покрытие ВНИИНП-229, вал 1X18H10T; втулка 9X18): 1 – 20°C; 2 – 100°C; 3 – 200°C; 4 – 300°C; 5 – 400°C

Таким образом, предложенная формула (1) с достаточным приближением позволяет прогнозировать коэффициент трения в сопряжении «вал с ТСП – втулка» в широком интервале температур.

### ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ «ВАЛ С ТСП-ВТУЛКА» С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Анализ долговечности работы сопряжения «вал с ТСП – втулка» (рис. 7) показал, что при удельных давлениях 55 МПа, скорости скольжения 0,1 м/с и комплексной характеристике шероховатости  $\Delta = 7,2 \cdot 10^{-2}$  наибольшая долговечность работы подвижных сопряжений с исследуемыми ТСП наблюдалась при температуре, соответствующей минимуму коэффициента трения. Для ТСП ВНИИНП-229 это соответствовало температуре 180°C, а ТСП СТС-4 и ЦВСП-3с – (250–280)°C. Указанные обстоятельства позволяют судить о наличии у каждого покрытия диапазона оптимальных по долговечности температур, смещающихся в сторону высоких температур при повышении термостойкости антифрикционного наполнителя и способности связующего вещества сохранять свои физико-механические свойства

ва, так как деструкция связующего неминуемо ведет к разрушению всего покрытия.



**Рис. 7.** Зависимость работоспособности ТСП от температуры: (вал ХН77ТЮ, втулка ХН55ВМКЮ;  $\bar{P} = 55$  МПа) для покрытия: 1 – ВНИИНП-229; 2 – ЦВСП-3с; 3 – СТС-4

Значения этих температур можно прогнозировать по результатам триботехнических исследований коэффициента трения. На всех испытанных образцах ТСП разрушается идентично. Вначале покрытие уплотняется, при этом происходит незначительное осыпание материала покрытия, преимущественно наполнителя, в виде мелкодисперсного порошка. Затем ТСП становится глянцевым, а с повышением температуры испытания «блеск» рабочей поверхности ТСП увеличивается. Поверхность ТСП ВНИИНП-229 с повышением температуры меняет свой цвет от темного (исходного) до светло-серого.

В условиях высоких температур, несмотря на размягчение связующего вещества, ТСП еще остается работоспособным до тех пор, пока не создается непосредственный металлический контакт. Непосредственно перед возникновением металлического контакта ТСП отшелушивается в виде чешуек, после чего часть материала ТСП налипает на контртело, другая часть, перемещаясь по «дорожке трения», забивает зазор и оказывает разрушающее действие на покрытие. В результате металлическая поверхность обнажается, происходит схватывание, вырыв частиц металла, которые «пропахивают» канавку в рабочей зоне вала и втулки, что приводит к задиру на поверхностях трения.

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что подвижные сопряжения «вал с ТСП – втулка» (подшипники скольжения) обеспечивают наиболее высокую долговечность при работе в критическом диапазоне температур (для ВНИИНП-229 – 180–220°C, для ЦВСП-3с и СТС-4 – 280–320°C). Это позволяет оптимизировать по триботехническим параметрам работу

высокотемпературных подвижных сопряжений с ТСП на стадии их проектирования.

2. На основании результатов исследования триботехнических свойств ТСП в подшипнике скольжения предложена и экспериментально проверена формула определения коэффициента трения в сопряжении «вал с ТСП – втулка» при высоких температурах.

3. Предложенная формула с достаточным приближением позволяет прогнозировать коэффициент трения в сопряжении «вал с ТСП – втулка».

4. Показано, что диапазон оптимальных, по долговечности температур смещается в сторону высоких температур при повышении термостойкости антифрикционного наполнителя и способности связующего вещества сохранять свои физико-механические свойства. Значения этих температур можно прогнозировать по результатам триботехнических исследований коэффициента трения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ворович, И. И.** Неклассические смешанные задачи теории упругости / И. И. Ворович, В. М. Александров, В. А. Бабешко. М.: Наука, 1974. 455 с.
2. **Воронков, Б. Д.** Подшипники сухого трения / Б. Д. Воронков. Л.: Машиностроение, 1979. 223 с.
3. **Горячева, И. Г.** Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. М.: Наука, 2001. 478 с.
4. **Горячева, И. Г.** Влияние покрытия на контактные характеристики радиальных подшипников скольжения / И. Г. Горячева, М. Н. Добычин // Трение и износ. 1984. Т. V, № 3. С. 124–131.
5. **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
6. **Крагельский, И. В.** Узлы трения машин / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
7. **Криони, Н. К.** Оптимизация по триботехническим параметрам работы высокотемпературных подшипников скольжения с твердыми смазочными покрытиями / Н. К. Криони. М.: Машиностроение, 2004. 157 с.

## ОБ АВТОРЕ



**Криони Николай Константинович**, проф., прорект. УГАТУ. Дипл. инж-мех. по техн. машиностр. (УАИ, 1971). Д-р техн. наук по трению и износу в машинах (РГУПиГ им. И. М. Губкина, 1985). Иссл. в обл. трибологии контактн. взаимодейств., методики и орг-ции учеб. процесса в высш. школе.