

Н. К. КРИОНИ

**ОЦЕНКИ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОДВИЖНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ С ТВЕРДЫМИ СМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

На основе предложенной физической модели локального подвижного контакта поверхностей твердых тел с твердым смазочным покрытием разработана методология комплексной оценки триботехнических и упругих свойств твердых покрытий для высокотемпературных подвижных сопряжений, позволяющей установить условия их наиболее эффективной работы по энергозатратам и долговечности. *Триботехника; твердые смазочные покрытия; высокотемпературные подвижные сопряжения*

Для нужд быстроразвивающихся отраслей промышленности необходимо создание твердых покрытий (ТП), в том числе твердых смазочных покрытий (ТСП), работоспособных при высоких температурах, вплоть до 1000 °С. Работы по созданию таких покрытий и их эффективному применению во многом сдерживаются отсутствием расчетных и экспериментальных методов обоснованной оценки триботехнических параметров в условиях высоких температур контакта, а также эффективных методик выбора твердых покрытий, в том числе ТСП, и оптимизации режимов их эксплуатации, обеспечивающих наименьшие энергозатраты и наибольшую долговечность.

Условия лабораторных экспериментальных исследований триботехнических свойств ТП, в том числе и высокотемпературных, весьма разнообразны и практически не дают возможности провести сравнительный анализ полученных результатов. Данные же по триботехническим свойствам ТСП, полученные на лабораторных установках, трудно использовать для прогнозирования триботехнических свойств высокотемпературных ТСП в реальных условиях. Поэтому актуальной остается проблема разработки методологии исследования определения триботехнических свойств ТСП, использование которой позволило бы оценивать работоспособность и возможные потери на трение в подвижных сопряжениях с ТСП при высоких температурах на стадии проектирования.

Известно, что подшипники скольжения широко распространены в современных машинах, работающих в условиях высоких температур.

Силы трения и интенсивность изнашивания в паре вал – втулка зависят от напряженного состояния в сопряжении. Как известно, напряженное состояние подшипника скольжения характеризуется дугой контакта вала с втулкой,

зависящей от угла охвата  $2\varphi_0$ , распределением контактных давлений  $P(\varphi_0)$  и максимальным значением контактного давления  $P_m$ . Высокие температуры и наличие ТСП на контакте также оказывают влияние на напряженное состояние в сопряжении вал-втулка. Оно существенно зависит и от соотношения геометрических параметров деталей сопряжения.

В общем виде решение контактной задачи для вала с ТСП-втулка приведено в работе И. Г. Горячевой и М. Н. Добычина [1]. Однако отсутствие данных по физико-механическим, триботехническим свойствам высокотемпературных покрытий, а также по влиянию материала подложки не позволяет оценить напряженное состояние в сопряжении вал с ТСП-втулка с достаточной степенью точности.

Для определения упругих характеристик ТСП и касательных напряжений, возникающих на границе раздела твердое смазочное покрытие – твердое тело с учетом температуры и давления на контакте, в работе используется физическая модель локального подвижного контакта с ТСП, впервые предложенная И. В. Крагельским и Н. М. Михиным, на основе которой разработан экспериментальный метод, учитывающий влияние физико-механических свойств материала подложки, а также анизотропию покрытий, которые под нагрузкой деформируются, уплотняются и изменяют свои исходные упругие свойства.

Согласно этой модели, шаровой индентор, имитирующий единичную внедрившуюся микронеровность, сжимали между двумя плоскими образцами с нанесенными на их рабочие поверхности ТСП до образования пластических деформаций в зонах контакта (рис. 1).

Затем нагревали зоны контакта, поворачивали шаровой индентор вокруг собственной оси, перпендикулярной плоскостям образцов, и измеряли момент, необходимый для поворота индентора. В точке перехода от предварительного смещения к скольжению определяли касатель-

ные напряжения  $\tau_A$ , возникающие на границе раздела контактирующих тел и обусловленные межатомными и межмолекулярными взаимодействиями, а также соответствующий этой точке угол  $\varphi_A$  поворота шарового индентора.

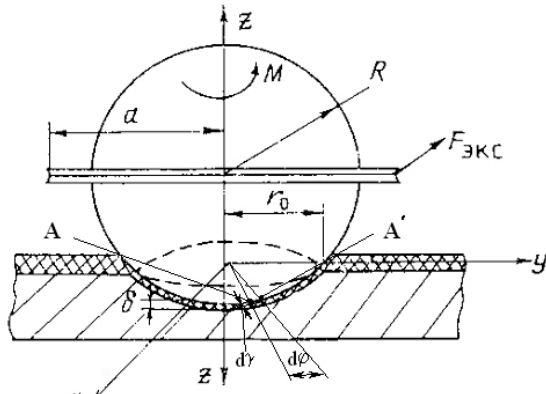


Рис. 1. Расчетная схема к определению упругих характеристик ТСП

По формуле

$$G = \tau_A \delta / (r_0 \varphi_A) \quad (1)$$

рассчитывали модуль  $G$  упругости второго рода, а по формуле

$$E = 2G(1 + \mu) \quad (2)$$

определяли модуль  $E$  упругости первого рода.

Для исследованных ТСП установлена зависимость модуля сдвига  $G$  от температуры (рис. 2).

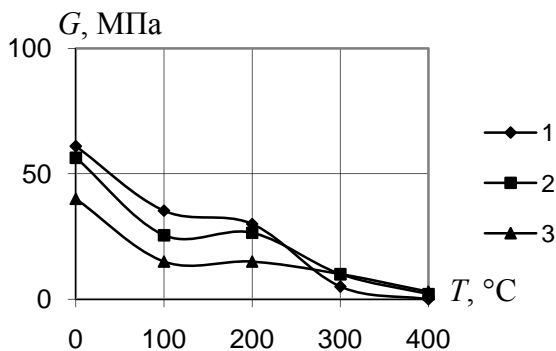


Рис. 2. Зависимость модуля сдвига  $G$  от температуры: покрытие: 1,2 – ВНИИНП-213, 3 – ВНИИНП-209; подложка: 1,3 – 40X, 2 – ВТ9; индентор: 1,2 – ШХ15, 3 – 9X18

Снижение значений модуля сдвига обусловлено, в основном, размягчением связующего вещества ТСП и, как следствие, уменьшением касательных напряжений  $\tau_A$  на границе раздела контактирующих тел. При температурах 300–350 °C упругие характеристики исследованных покрытий практически равны нулю и в непосредственном контакте под шаровым индентором происходит нарушение сплошности

ТСП, что соответствует потере прочностных свойств связующего вещества.

Анализ результатов, полученных в широком диапазоне изменения соотношений упругих свойств материалов вала, втулки и покрытия и толщины покрытий (по аналогии с [1]), показал, что с погрешностью по углу контакта, не превышающей 3% от истинной величины, можно не учитывать свойства покрытия при условии, что  $\delta / R\varphi_0 \leq 8 \cdot 10^{-3}$ . Если же  $\delta / R\varphi_0 \leq 8 \cdot 10^{-2}$ , то контактные параметры сопряжения могут быть вычислены из условия, что тела вала и втулки жесткие. В остальных случаях следует принимать во внимание упругие свойства всех трех тел (вала, втулки и твердого покрытия).

Экспериментальные исследования триботехнических свойств ТСП в сопряжении вал с ТСП-втулка в условиях высоких температур проводились на специально разработанной высокотемпературной установке МТП-6 [3]. Высокотемпературная установка представляет собой машину трения со сменными трибоизмерительными высокотемпературными модулями. Это существенно сокращает время для накопления необходимой экспериментальной информации. Установка позволяет оценивать на шести трибоизмерительных модулях одновременно антифрикционные свойства и износостойкость ТСП в сопряжении вал – втулка в диапазоне температур от 20 °C до 800 °C при различных скоростях скольжения и удельных нагрузках.

Покрытие твердой смазки толщиной порядка 25 мкм наносилось на цилиндрические поверхности валов. Рабочая поверхность втулок подготавливалась тонким растачиванием. Режимы обработки рабочих поверхностей втулок были подобраны таким образом, чтобы характеристики микрогеометрии поверхностей воспроизводились достаточно стабильно, с рассеиванием порядка  $\pm(8-10)\%$ . Действительные размеры (внутренний диаметр втулки и наружный диаметр вала с ТСП) определяли на универсальном измерительном микроскопе УИМ-23 проекционным методом. Погрешность измерения диаметров отверстий и валов составляла  $\pm 2,0$  мкм. Скорость скольжения во время проведения испытаний была постоянной и не превышала 0,1 м/с, т.е. была достаточно малой, чтобы исключить влияние температуры. Лабораторные эксперименты проводились при контактных давлениях 55 МПа, что соответствует условиям работы в тяжелонагруженных подвижных сопряжениях машин.

Исходя из характеристик системы и методики эксперимента, выполнен анализ погрешностей триботехнических и физико-механических

характеристик материалов, который показал, что погрешности лежат в интервале от  $\pm 0,7\%$  до  $\pm 2,2\%$ , что вполне приемлемо при экспериментальных исследованиях.

Коэффициент внешнего трения в подшипнике скольжения при пластическом ненасыщенном контакте в зависимости от действующей нагрузки и конструктивно-технологических, материаловедческих и эксплуатационных характеристик равен [2]

$$f = f_m + f_d = f_m + \frac{0.43\Delta^{0.5}}{HB^{0.25}} \left[ \frac{(P\varepsilon_3 E_1^{0.25})}{Rl^{0.25} \xi^{0.5}} \right]^{0.25}, \quad (3)$$

$$\text{где } \xi = 1 - \mu_1^2 + (1 - \mu_2^2) \frac{E_1}{E_2}.$$

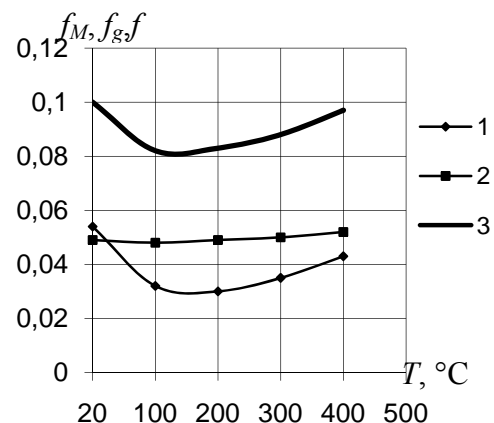
Известно [2], что молекулярная составляющая  $f_m$  коэффициента трения существенно зависит от параметров  $\tau_0$  и  $\beta$ , характеризующих физико-химическое состояние поверхностей трения, а также от фактического давления. Деформационная составляющая  $f_d$  коэффициента трения в значительной степени зависит от шероховатости поверхности втулки, давления и физико-механических свойств материалов втулки и вала.

Наличие на поверхности твердых тел ТСП оказывает существенное влияние на взаимодействие трибосопряжений. Повышение температуры трущихся тел приводит к интенсификации физико-химических процессов на поверхностях трения и к существенному изменению физико-механических характеристик контактирующих тел. Эти явления могут по-разному влиять на состояние поверхностных слоев и внутри материала сопрягаемых деталей. Поэтому можно предположить, что при взаимодействии твердых тел при высоких температурах и наличии ТСП на их поверхностях закономерности изменения деформационной и молекулярной составляющих коэффициента трения могут быть различными.

Определение деформационной составляющей коэффициента трения расчетным путем не представляет каких-либо трудностей. Теоретически вычислить молекулярную составляющую коэффициента трения в реальных условиях пока не представляется возможным, вследствие наличия на поверхностях твердых тел пленок, толщина и структура которых зависят от окружающей среды. Для нахождения молекулярной составляющей коэффициента трения необходимо определить касательные напряжения, возникающие в зонах фактического касания и обусловленные межатомными и межмолекулярными

взаимодействиями. Для определения касательных напряжений в работе используется описанная выше физическая модель локального подвижного контакта поверхностей твердых тел с твердым покрытием, на основе которой создано оборудование и разработан метод оценки триботехнических параметров такого контакта с учетом температуры и давления.

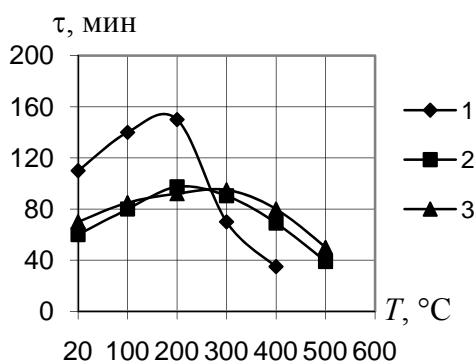
Экспериментальные исследования влияния температуры на триботехнические свойства ТСП в подшипнике скольжения проводили в диапазоне изменения температур от нормальных до  $400\text{--}550\text{ }^\circ\text{C}$ . Исследования выполняли с использованием тех же материалов, что и для исследования молекулярной составляющей коэффициента трения. Одинаково производили подготовку поверхностей образцов. На основании результатов исследования триботехнических свойств ТСП в подшипнике скольжения экспериментально подтверждена (рис.3) предложенная формула (3) определения коэффициента трения в сопряжении «вал с ТСП-втулка» при высоких температурах.



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента трения и его составляющих от температуры: вал ХН60ВТ, втулка ХН55ВМКЮ, покрытие ВНИИНП-229; составляющие коэффициента трения: 1 – молекулярная, 2 – деформационная, 3 – общий коэффициент трения

Экспериментальные значения коэффициента трения (отдельные точки) хорошо совпадают со значениями (сплошная линия 3), полученными в результате суммирования экспериментально определенной в лабораторных условиях молекулярной составляющей коэффициента трения  $f_m$  (отдельные точки линии 1) и вычисленной в зависимости от температуры деформационной  $f_d$  (отдельные точки линии 2) составляющей коэффициента трения.

Анализ долговечности работы сопряжения вал с ТСП-втулка (рис. 4) 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.



**Рис. 4.** Зависимость работоспособности ТСП от температуры. Покрытие – ВНИИНП-229 (1), СТС-4 (2), ЦВСП-3с (3); вал – ХН60ВТ; втулка – ХН55ВМКЮ;  $\bar{P}=55$ МПа

Для ТСП ВНИИНП-229 это соответствовало температуре 180 °С, а ТСП СТС-4 и ЦВСП-3с – (250–280) °С. 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, так как деструкция связующего неминуемо ведет к разрушению всего покрытия. Значения этих температур можно прогнозировать по результатам триботехнических исследований коэффициента трения.

Таким образом, на основе предложенной физической модели локального подвижного контакта поверхностей твердых тел с твердым покрытием создано оборудование и разработана методология комплексной оценки триботехнических свойств и выбора твердых покрытий для высокотемпературных подвижных сопряжений, позволяющей установить условия их наиболее эффективной работы по энергозатратам и долговечности.

#### Список обозначений

$\delta$  – толщина слоя ТСП;  $r_0$  – радиус отпечатка;  $R$  – радиус отверстия;  $f_m$  – молекулярная

составляющая коэффициента трения;  $f_d$  – деформационная составляющая коэффициента трения;  $\Delta$  – комплексная характеристика шероховатости;  $HV$  – твердость материала по Бригеллю;  $P$  – нормальная нагрузка;  $\epsilon_r$  – радиальный зазор в сопряжении вал–втулка;  $l$  – длина втулки;  $\mu_1, \mu_2, E_1, E_2$  – коэффициенты Пуассона и модули упругости соответственно материалов вала и втулки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячева И. Г., Добычин М. Н. Влияние покрытия на контактные характеристики радиальных подшипников скольжения // Трение и износ. 1984. т. V, № 3. С. 124–131.
2. Крагельский И. В., Михин Н. М. Узлы трения машин: справ. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
3. Михин Н. М., Криони Н. К. Установка для исследования триботехнических свойств материалов в условиях высоких температур // Заводская лаборатория. 1985. т. 50, № 3. С. 73–78.

#### ОБ АВТОРАХ

**Криони Николай Константинович**, профессор, проректор УГАТУ. Дипл. инж.-механик по технологии машиностроения (УАИ, 1971). Доктор техн. наук по трению и износу в машинах (РГУНиГ им. академика И. М. Губкина, 2005). Иссл. в обл. трибологии, контактного взаимодействия твердых тел.