

УДК 621.892

Н. К. КРИОНИ

## ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ «ВАЛ С ТВЕРДЫМ СМАЗОЧНЫМ ПОКРЫТИЕМ–ВТУЛКА» С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассмотрено влияние температуры на долговечность сопряжения «вал с твердым смазочным покрытием–втулка» с учетом температуры. *Покрывтие; температура; вал; втулка; долговечность*

В связи с широким использованием твердых смазочных покрытий (ТСП) в распространенных подвижных сопряжениях типа вал–втулка представляет интерес оценка долговечности сопряжения «вал с ТСП–втулка». Обычно эти сопряжения работают в условиях высоких температур.

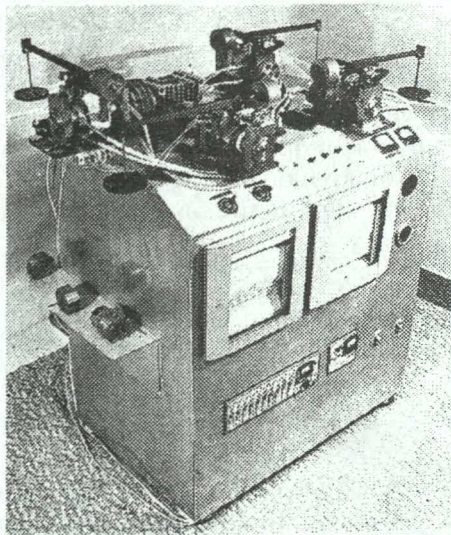


Рис. 1. Установка МТП-6

С целью исследования триботехнических свойств высокотемпературных ТСП в широко распространенных подвижных сопряжениях вал–втулка была разработана и изготовлена шестипозиционная высокотемпературная установка МТП-6 [1]. Она представляет собой машину трения со сменными трибоизмерительными, высокотемпературными модулями (рис. 1), что позволяет существенно сократить трудоемкость накопления необходимой экспериментальной информации. Установка позволяет оценивать на шести трибоизмерительных модулях одновременно антифрикционные свойства и долговечность ТСП

в сопряжении вал–втулка в диапазоне температур от 20 до 800°C при различных скоростях скольжения и удельных нагрузках.

Установка сконструирована по блочному типу. На верхней испытательной панели установки расположены шесть трибоизмерительных модулей.

Термический трибоизмерительный модуль (рис. 2) представляет собой автономный узел, в котором конструктивно объединены образцедержатель с узлом трения, электроннагревательный блок, устройство нагружения и измерения момента сил трения.

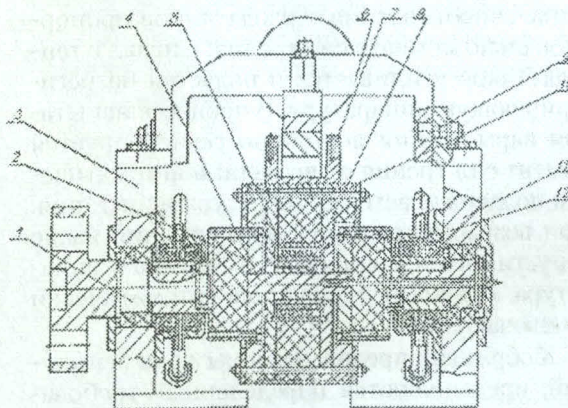


Рис. 2. Термический трибоизмерительный модуль

Установка работает следующим образом (рассмотрим на примере одного трибоизмерительного модуля). В корпусе нагревателя 8 (см. рис. 2) устанавливается исследуемая пара трения вал 4 – втулка 5. Свободные концы вала 4 устанавливаются в отверстия дисков 2 и 12, для этого стойки 11 и 3 подводят к электроннагревательному блоку 10 и одновременно устанавливают оси 9 в отверстия коромысла 6 рычага устройства нагружения. Вал 1

с помощью муфты соединяется с червячным редуктором. Затем закрепляются стойки 11 и 3 на направляющей планками. На потенциометрах, регистрирующих момент сил трения и температуру, прерыватели устанавливаются на заданную температуру испытания и максимальный момент сил трения. Включаются вторичные приборы. Проверяется «нуль» регистрирующих приборов для замера момента сил трения и температуры. Затем тумблером на пульте управления включают нагреватель и включают систему охлаждения подшипниковых узлов. При достижении в зоне испытания требуемой температуры нагрузочным устройством создается необходимая нормальная нагрузка, и плавным поворотом рукоятки задатчика скорости устанавливают нужную скорость вращения образца-вала 4. При этом вращение от двигателя через червячный редуктор передается на вал 1 трибоизмерительного модуля, а от него — образцедержателю вала 2. Момент сил трения, возникающий при вращении вала 4 относительно втулки 5, стремится повернуть втулку 5 вместе с корпусом нагревателя 8 и корпусом 10, но этому препятствует рычаг 2, жестко связанный с упругим кольцом и корпусом 10. Угол поворота корпуса 10 регистрируется тензодатчиками, так как при этом происходит деформация кольца вдоль рычага 2 под действием момента сил трения и, следовательно, изменение сопротивления тензодатчиков пропорционально моменту сил трения. Сигнал с тензодатчиков усиливается и подается на регистрирующую аппаратуру. В процессе испытания пары трения постоянно регистрируется момент сил трения от времени и автоматически поддерживается температура испытания. При возрастании момента сил трения выше допустимого значения регистрирующая аппаратура, привод и нагреватель автоматически выключаются.

К образцам, предназначенным для испытаний, предъявляются определенные требования, строгое соблюдение которых обеспечит высокую точность и воспроизводимость результатов испытаний.

С целью обеспечения взаимозаменяемости образцов их рекомендуется изготавливать с определенными предельными отклонениями, при этом для верхнего и нижнего предельных отклонений размеров валов перед покрытием рекомендуется свой диапазон толщин покрытия. В случае промежуточных отклонений размеров, в пределах поля допуска, толщина покрытия 8 должна составлять  $20 \pm 5$  мкм.

Образцы вала и втулки изготавливаются из пержавлющей стали аустенитного класса 1X18H10T, жаропрочных сплавов ХН77ТЮ, ХН55ВМКЮ.

Выбор этих материалов для испытаний обусловлен их жаропрочностью при высоких температурах, а также способностью к схватыванию при трении, что позволяет повысить точность определения момента появления непосредственного металлического контакта при разрушении ТСП.

Покрытие твердой смазки наносится на предварительно подготовленные цилиндрические поверхности валов по заводской технологии.

Рабочая поверхность втулок получается тонким растачиванием. На профилографе М201 снимается профилограмма рабочей поверхности втулки и вала. Затем профилограммы обрабатываются согласно [2, 3] и по результатам строятся кривые опорной поверхности, по которым строится результирующая кривая обработанной партии. Построение производится по средним значениям при отклонении  $\pm(10-15)\%$ . Затем выделяется начальный участок кривой, поскольку, согласно [4-6], относительным сближениям в реальных условиях соответствует начальный участок кривой опорной поверхности. Интерпретация этой кривой в логарифмических координатах дает прямолинейную зависимость

$$t_p = b\varepsilon^v, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — относительное сближение, рассчитываемое как

$$\varepsilon = \frac{h}{R_{\max}}, \quad (2)$$

где  $h$  — абсолютное сближение;  $R_{\max}$  — высота максимальной микронеровности на базовой длине;  $b$  и  $v$  — параметры опорной кривой.

Обработка опорной кривой по методу наименьших квадратов позволяет определить параметры кривой опорной поверхности  $b$  и  $v$ . Режимы обработки рабочих поверхностей втулок были подобраны таким образом, чтобы характеристики  $b$  и  $v$  воспроизводились достаточно стабильно, с рассеиванием порядка  $\pm(8-10)\%$ , от партии к партии. Параметры кривой опорной поверхности имели следующие значения:  $b = 1,52$  и  $v = 1,4$ .

По профилограмме определялись характеристики микрогеометрии: максимальная высота микронеровностей  $R_z = 3,6$  мкм, средний радиус закругления микронеровностей

$R = 35$  мкм. Рассчитывался комплексный параметр шероховатости поверхности по формуле [2]

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{Rb^{\frac{1}{v}}}. \quad (3)$$

В исследованиях  $\Delta = 7,2 \cdot 10^{-2}$ .

Действительные размеры (внутренний диаметр втулки и наружный диаметр вала с ТСП) определяются на универсальном измерительном микроскопе УИМ-23 проекционным методом. Погрешность измерения диаметров отверстий и валов составляет  $\pm 2,0$  мкм.

Подготовка образцов перед экспериментом производится по методике А. С. Ахматова [7]: путем обезжиривания в органических растворителях и обработки активированным углем. Установка образцов в образцедержатель производится с соблюдением всех мер предосторожности против возможного загрязнения поверхностей образцов.

Скорость скольжения во время проведения испытаний постоянна и не превышает  $0,1$  м/с, т. е. достаточно мала, чтобы исключить значительные температурные эффекты на поверхности раздела, вызванные скоростью скольжения.

Производились испытания следующих марок ТСП: ВНИИНП-229, СТС-4 и ЦВСП-3с. Испытывались ТСП при температурах воздуха от  $20$  до  $(400-650)^\circ\text{C}$  и контактных давлениях  $55$  МПа, которые соответствовали давлениям в тяжело нагруженных подвижных сопряжениях машин.

Как известно [3], 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  $P_m$ .

Распределение контактных давлений подчиняется закону

$$P(\varphi) = P_m \left[ 1 - \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Расчет нагрузки и угла охвата делался из условия обеспечения постоянства наперед заданного начального среднего давления на контакте  $\bar{P}$

$$\bar{P} = \frac{P_0}{2R_1\varphi_0}, \quad (5)$$

где  $P_0$  — нагрузка на единицу длины сопряжения;  $R_1$  — радиус втулки;  $\varphi_0$  — полуугол

охвата, при изменении геометрических параметров подвижного сопряжения вал-втулка с ТСП, нанесенным на вал, с учетом влияния температуры испытания. Расчеты угла охвата и нагрузки сопряжения вал-втулка производятся по формуле [3]

$$\varphi_0 = 0,32 \left[ \left( \frac{C_0}{0,12} + 1 \right) \frac{\alpha}{\alpha + 1} \right]^n, \quad (6)$$

где

$$C_0 = \frac{\pi}{4} [(1 - v_1^2) + \psi(1 - v_2^2)];$$

$$\alpha = \frac{P_0}{E_1 \varepsilon}; \quad \psi = \frac{E_1}{E_2}; \quad \varepsilon = R_1 - R_2;$$

$R_1$  и  $R_2$  — радиусы вала и втулки соответственно,  $v_1$  и  $v_2$  — коэффициенты Пуассона, соответственно материалов втулки и вала;  $E_1$  и  $E_2$  — модули упругости, соответственно материалов втулки и вала;  $n$  — показатель степени, зависящий от  $\psi$ .

Поскольку параметр  $\alpha$  зависит от  $P_0$ , то решение уравнения (4) является весьма трудоемким. На основе метода последовательных приближений был произведен расчет величины  $P_0$  для диапазона изменения параметра  $\varepsilon E_1$  от  $0,5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^3$  Н/мм. Результаты этих расчетов приведены на рис. 3. График этой зависимости позволяет не только оценить значение контактных параметров в начале испытания, но и проследить за их изменением в ходе испытаний.

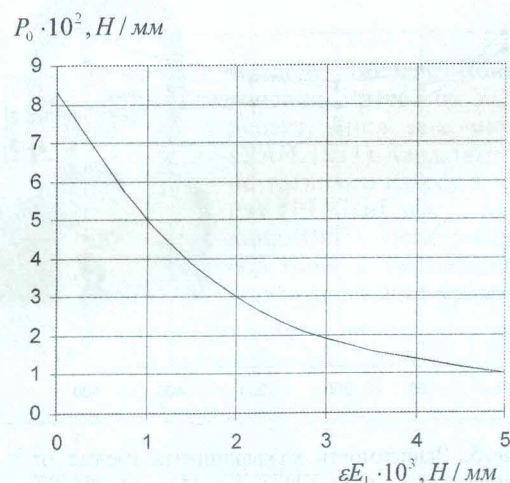


Рис. 3. Зависимость погонной нагрузки от параметра  $\varepsilon E_1$

Так, например, зная величину износа покрытия, можно определить с помощью графика величину нагрузки на единицу длины

сопряжения, а затем средних напряжений на контакте.

Благодаря зависимости  $P_0$  от  $\varepsilon E_1$  (см. рис. 3), созданы определенные предпосылки для обеспечения в экспериментах постоянства среднего контактного давления  $\bar{P}$ , зависящего от соотношения размеров деталей подвижного сопряжения, что позволяет изучать непосредственное влияние объемной температуры на триботехнические свойства ТСП при прочих равных условиях.

В приведенных расчетах не учитываются механические свойства покрытия, так как толщина покрытия  $\delta$  мала по сравнению с размерами дуги контакта [8].

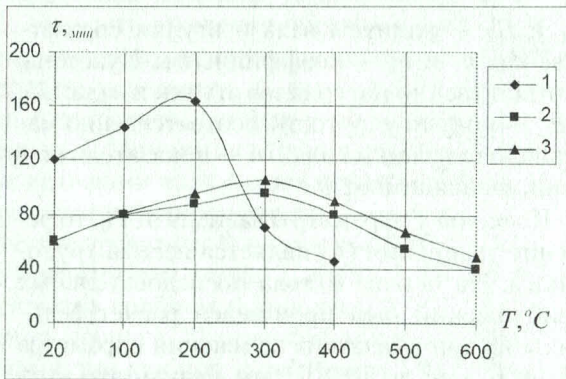


Рис. 4. Зависимость работоспособности ТСП от температуры: вал ХН77ТЮ (1), 1Х18Н10Т (2, 3); втулка ХН55ВМКЮ (1, 2, 3); покрытие ВНИИНП-229 (1), ЦВСП-3с (2), СТС-4 (3)

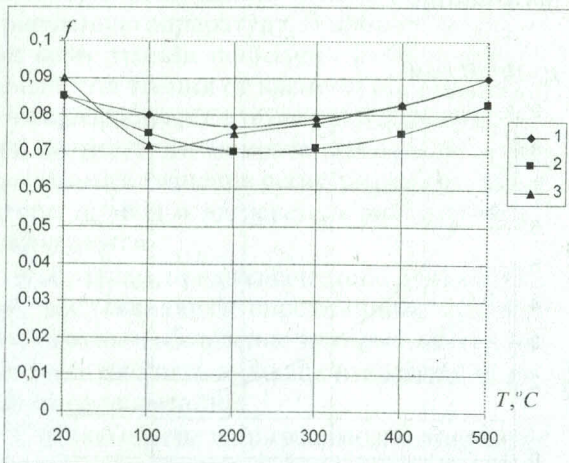


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от температуры: вал ХН77ТЮ (1), 1Х18Н10Т (2, 3); втулка ХН55ВМКЮ (1, 2, 3); покрытие ВНИИНП-229 (1), ЦВСП-3с (2), СТС-4 (3)

Анализ долговечности работы сопряжения «вал с ТСП–втулка» (рис. 4) показал, что при удельных давлениях 55 МПа, скорости скольжения 0,1 м/с и  $\Delta = 7,2 \cdot 10^2$

наибольшая долговечность работы в исследуемых ТСП наблюдалась при температуре, соответствующей минимуму коэффициента трения (рис. 5). 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, так как деструкция связующего неминуемо ведет к разрушению всего покрытия.

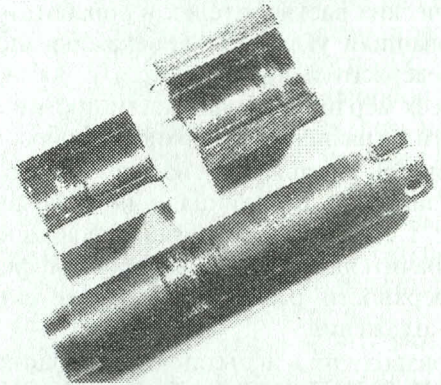


Рис. 6. Покрытие СТС-4. Температура испытания 500°С

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 налипают 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 (рис. 6).

Внешний вид ТСП, испытанных при различных температурах, приведен на рис. 7.

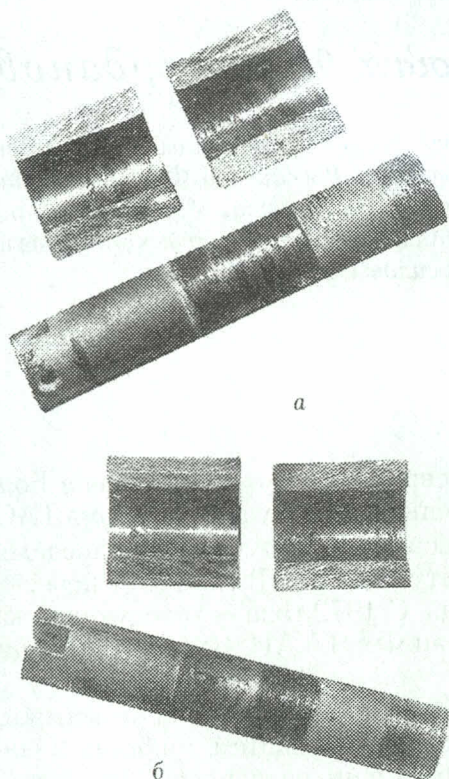


Рис. 7. Внешний вид ТСП: а — покрытие ВНИИПП-229, температура испытания 300°С; б — покрытие ЦВСП-3с, температура испытания 350°С

Таким образом, для исследованных ТСП установлена существенная зависимость их долговечности от температуры в сопряжении «вал с ТСП-втулка». Наибольшая долговечность работы в исследуемых ТСП наблюдалась при температуре, соответствующей минимуму коэффициента трения. Для ТСП ВНИИПП-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, сменяющихся 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.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криони Н. К., Михин Н. М. Установка для исследования триботехнических свойств материалов в условиях нормальных и высоких температур // Заводская лаборатория. 1985. Т. 50, № 3. С. 36–39.
2. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 223 с.
3. Трение, изнашивание и смазка: Справочник / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алипина. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. 399 с.; 1979. Т. 2. 358 с.
4. Гриб В. В., Лазарев Т. Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М.: Наука, 1968. 115 с.
5. Крагельский И. В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
6. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1977. 181 с.
7. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.

#### ОБ АВТОРЕ



Криони Николай Константинович, проректор УГАТУ, доцент. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1971). Канд. техн. наук по трению и износу в машинах (РГУиГ им. И. М. Губкина, 1985). Исследования в обл. трибологии, контактного взаимодействия твердых тел.