

УДК 621.892

Н. К. КРИОНИ

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПО ТРИБОТЕХНИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОДВИЖНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ С ТВЕРДЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Представлены теоретико-экспериментальные обобщения по проблемам внешнего трения скольжения «твердые смазочные покрытия (ТСП)–твердое тело» с учетом температуры и давления, позволяющие прогнозировать триботехнические характеристики реальных подвижных сопряжений на стадии проектирования. *Твердое покрытие; температура; вал; втулка; долговечность*

Поверхности твердых тел обычно покрыты пленками, состав и свойства которых существенно зависят от окружающей среды. Это, например, пленки оксидов, пленки адсорбированных из окружающей среды веществ, различного рода «загрязнения» и естественные граничные пленки. Такие пленки оказывают существенное влияние на взаимодействие контактирующих твердых тел. На свойства адсорбционных и хемосорбционных пленок, возникающих на поверхностях твердых тел, оказывают влияние многочисленные факторы. Однако в некоторых случаях, учитывая условия и режимы эксплуатации сопряжений и сведя к минимуму вероятность появления различных возмущающих факторов, можно осуществить направленное модифицирование поверхности за счет проведения определенных конструктивно-технологических мероприятий. К их числу относится нанесение на поверхности трения различных твердых пленок, в том числе ТСП. Целью нанесения твердых пленок является придание контактирующим поверхностям деталей машин требуемых эксплуатационных свойств, таких как: нормальная и тангенциальная жесткости, износостойкость, антифрикционность, коррозионная стойкость, электро- и теплопроводность контакта и т. п.

Большинство твердых пленок, нанесенных на поверхности тел, при соответствующих условиях контактирования проявляют определенное антифрикционное и противозносное действие, т. е. обеспечивают положительный градиент механических свойств по глубине тел.

В настоящее время ТСП получают все большее применение, особенно в узлах трения, работающих в экстремальных условиях (в силу специфичности их триботехнических свойств, отличающих ТСП от традиционных смазочных материалов).

На триботехнические свойства ТСП влияют многочисленные факторы: технологические (состав покрытия — химическая природа связующего вещества и антифрикционного компонента, их соотношение, технология приготовления суспензии, способы ее нанесения и отверждения на трущихся поверхностях и др.); действие среды — различные газовые среды (кислород воздуха, инертные газы), вакуум, жидкие среды (вода, минеральные и синтетические масла), агрессивные среды (кислоты, основания и т. д.), ионизирующие излучения; факторы, постоянно сопутствующие трению (температура, нагрузка, скорость скольжения); конструктивные факторы (материалы трущейся пары, их твердости, наличие зазора между сопряженными деталями, обеспечение теплоотвода и др.).

Однако условия экспериментального исследования триботехнических свойств ТСП весьма разнообразны и, в основном, проводятся по пути решения частных задач. Как теоретически, так и экспериментально влияние ТСП на процесс внешнего трения при высоких температурах изучено недостаточно. Исследование триботехнических свойств ТСП в реальных подвижных сопряжениях в большинстве случаев обусловлено большими техническими и экономическими затратами.

К числу важных вопросов, возникающих при разработке новых ТСП, работающих в

экстремальных условиях, относится выбор надежных и воспроизводимых методов определения триботехнических свойств ТСП. Известно, что наиболее надежный метод испытания — это опробование их в реальных условиях эксплуатации. Однако в большинстве случаев это слишком трудоемко и дорого. Поэтому было разработано много лабораторных методов испытаний, имитирующих отдельные стороны эксплуатационных условий.

На основании анализа выполненных ранее исследований установлено, что на триботехнические свойства твердых покрытий (ТП) оказывают влияние большое количество факторов, которые необходимо учитывать при разработке новых ТП, в том числе ТСП, и при создании оптимальных подвижных сопряжений с ТСП, а также при разработке инженерных методов расчета сил трения и износа. Однако механизм внешнего трения ТСП-твердое тело, особенно в условиях высоких температур, изучен еще недостаточно.

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 методики 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. Однако создание такой методики невозможно без глубокого изучения механизма внешнего трения ТСП-твердое тело.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подшипники скольжения широко распространены в современных машинах, работающих в условиях высоких температур.

Силы трения и интенсивность изнашивания пары вал-втулка зависят от напряженного состояния в сопряжении (рис. 1). 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 да-

вления P_m . Высокие температуры работы и наличие ТСП на контакте оказывают влияние на напряженное состояние в сопряжении вал-втулка. Кроме того, контактные параметры сопряжения вал-втулка существенно зависят от соотношения геометрических параметров деталей сопряжения.

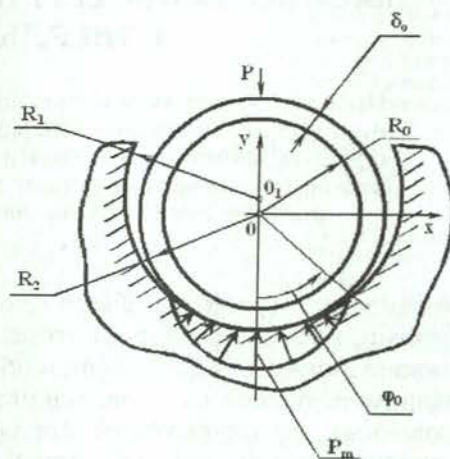


Рис. 1. Расчетная схема подшипника скольжения с антифрикционным элементом, закрепленным на валу

В общем виде решение контактной задачи для вала с ТСП-втулка приведено в работах 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 с учетом температуры и давления на контакте предложена физическая модель локального подвижного контакта с ТСП, на основе которой разработан экспериментальный метод [2], учитывающий влияние физико-механических свойств материала подложки, а также анизотропию покрытий, которые под нагрузкой деформируются, уплотняются и изменяют свои исходные упругие свойства.

Шаровой индентор, имитирующий единичную внедрившуюся микронеровность, при этом сжимали между двумя плоскими образцами с нанесенными на их рабочие поверхности ТСП до образования пластических деформаций в зонах контакта (рис. 2).

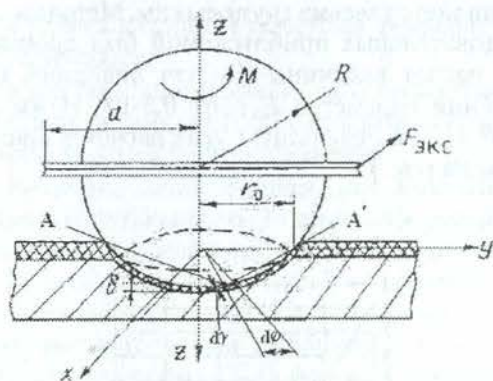


Рис. 2. Схема к определению упругих характеристик ТСП

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 касательные напряжения τ_A , возникающие на границе раздела контактирующих тел и обусловленные межатомными и межмолекулярными взаимодействиями, а также соответствующий этой точке угол φ_A поворота шарового индентора.

По формуле

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

где δ — толщина слоя ТСП; r_0 — радиус отпечатка, рассчитывали модуль G упругости второго рода, а по формуле

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

где μ — коэффициент Пуассона, определяли модуль E упругости первого рода.

Для исследованных ТСП установлена зависимость модуля сдвига G от температуры (рис. 3).

Снижение значений модуля сдвига обусловлено, в основном, размягчением связующего вещества ТСП и, как следствие, уменьшением касательных напряжений τ_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 толщины покрытий и соотношений упругих свойств материалов

вала, втулки и покрытия, показал, что с погрешностью по углу контакта, не превышающей 3% от истинной величины, можно не учитывать свойства покрытия при условии, что $\delta_0/R_1\varphi_0 \leq 8 \cdot 10^{-3}$, где R_1 — радиус отверстия (см. рис. 1). Если же $\delta_0/R_1\varphi_0 \leq 8 \cdot 10^{-2}$, 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).

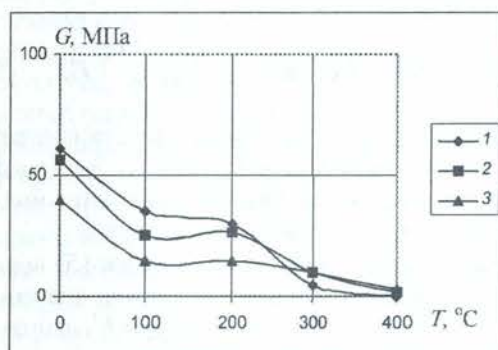


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига G от температуры: покрытие ВНИИП-213 (1, 2); ВНИИП-209 (3); подложка 40X (1, 3); BT9 (2); индентор ШХ15 (1, 2); 9X18 (3)

Кроме того, контактные параметры сопряжения вал–втулка зависят от физико-механических свойств материалов тел сопряжения. В выполненных исследованиях толщина покрытия мала (5–25 мкм) по сравнению с размерами зоны контакта, что позволило при расчете контактных параметров сопряжения пренебречь наличием тонкослойного покрытия. Тогда средние давления \bar{P} на контакте вал–втулка равны

$$\bar{P} = \frac{P_0}{2R_1\varphi_0}, \quad (3)$$

полуугол охвата φ_0

$$\varphi_0 = 0,32 \left[\left(\frac{C_0}{0,12} + 1 \right) \frac{\alpha}{\alpha + 1} \right]^n, \quad (4)$$

где R_1 — радиус втулки, P_0 — нагрузка на единицу длины сопряжения, $C_0 = \frac{\pi}{4} [(1 - \mu_1^2) + \psi(1 - \mu_2^2)]$; $\alpha = \frac{P_0}{E_1 \varepsilon}$; $\psi = \frac{E_1}{E_2}$; μ_1 и μ_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 ψ .

Из выражения (4) следует, что с изменением температуры контактирующих тел полуугол охвата определяется температурной зависимостью упругих свойств материалов сопряжения при прочих равных условиях. Материалами подшипников скольжения, работающими в условиях высоких температур, как правило, являются жаропрочные стали и сплавы, которые по своей природе сохраняют высокие значения прочности при рабочих температурах.

Модуль упругости E' жаропрочных материалов от температуры T' определяется следующей зависимостью:

$$E' = \eta E = \left(1 - 4,6 \cdot 10^{-5} (T')^{\frac{1}{3}}\right) E, \quad (5)$$

где E — модуль упругости материала, соответствующий температуре $T = 20^\circ\text{C}$; η — коэффициент, характеризующий изменение модуля упругости материала при нагреве.

Тогда с учетом выражений (4) и (5) после преобразований можно определить значение φ'_0 , соответствующее температуре T' , в виде

$$\varphi'_0 = \varphi_0 \left(\frac{\alpha + 1}{\alpha + \eta}\right)^n, \quad (6)$$

где φ_0 и α — значения полуугла охвата и безразмерного параметра, определенные при комнатной температуре, и средние контактные давления \bar{P}' , соответствующие температуре T'

$$\bar{P}' = \bar{P} \left(\frac{\alpha + \eta}{\alpha + 1}\right)^n, \quad (7)$$

где \bar{P} и α — значения средних контактных давлений и безразмерного параметра α , определенные при комнатной температуре.

Для исследования непосредственного влияния температуры на триботехнические свойства ТСП при прочих равных условиях был произведен расчет нагрузки и угла охвата из условия обеспечения постоянства наперед заданного начального среднего давления на контакте \bar{P} при изменении геометрических параметров подвижного сопряжения вал-втулка с ТСП. Расчеты нагрузки и угла охвата сопряжения вал-втулка выполняли по формуле

$$P_0 = 0,64 R_1 \bar{P} \left[\left(\frac{C_0}{0,12} + 1 \right) \frac{\alpha}{\alpha + 1} \right] \quad (8)$$

с учетом того, что для исследуемых сопряжений $R_1 = 6$ мм, $\bar{P} = 55$ МПа. Поскольку параметр α зависит от P_0 , то решение уравнения

(8) является весьма трудоемким. Методом последовательных приближений был произведен расчет величины P_0 для диапазона изменения параметра $E_1 \epsilon$ от $0,5 \cdot 10^3$ Н/мм до $5 \cdot 10^3$ Н/мм. Результаты этих расчетов приведены на рис. 4.

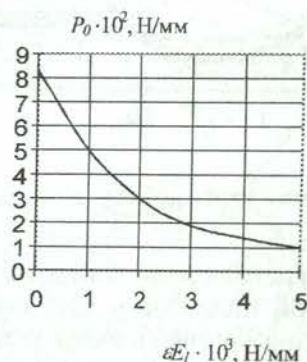


Рис. 4. Зависимость погонной нагрузки от параметра ϵE_1

Полученная зависимость позволяет не только оценить значения фрикционных параметров контакта в начале испытания, но и проследить за их изменением в ходе испытаний, зная величину износа покрытия и характер изменения модуля упругости материалов от температуры.

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

- подшипниковый узел состоит из вала с ТСП и втулки;
- площадь контакта, образованная между валом с ТСП и втулкой под нагрузкой N , равна контурной площади касания, т. е. макротоклонения 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;
- 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 $t_p = b\epsilon^v$, где ϵ — относительное сближение;
- твердость ТСП намного меньше твердости материалов вала и втулки;

- 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, будет зависеть от вида деформаций в зонах фактического касания [3]. 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 реализовываться и пластические деформации.

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

$$f = f_m + \frac{0,43\Delta^{0,5}}{HB^{0,25}} \left[\frac{(P\varepsilon_3 E_1^{0,25})}{Rl^{0,25} \xi^{0,5}} \right]^{0,25}, \quad (9)$$

где f_m — молекулярная составляющая коэффициента трения; Δ — комплексная характеристика шероховатости; HB — твердость материала по Бринеллю; P — нормальная нагрузка; ε_3 — радиальный зазор в сопряжении вал-втулка; R — номинальный радиус сопряжения; l — длина втулки; $\xi = 1 - \mu_1^2 + (1 - \mu_2^2) \frac{E_1}{E_2}$, μ_1 , μ_2 , E_1 , E_2 — коэффициенты Пуассона и модули упругости соответственно материалов вала и втулки.

Из выражения (9) следует, что коэффициент внешнего трения сопряжения вал-втулка равен сумме молекулярной и деформационной составляющих коэффициента трения. Известно, что молекулярная составляющая коэффициента трения существенно зависит от параметров τ_0 и β , характеризующих физико-химическое состояние поверхностей трения, а также от фактического давления. Деформационная составляющая 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. Изменение температуры трущихся тел приводит к интенсификации физико-химических процессов на поверхностях трения и к существенному изменению физико-механических характеристик тел. Закономерность изменения свойств

поверхностных слоев и объемных характеристик будет иметь различную природу. 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 будут различны.

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 межмолекулярными и межмолекулярными взаимодействиями. Для определения касательных напряжений нами предложена физическая модель локального подвижного контакта поверхностей твердых тел с ТП, на основе которой создано оборудование и разработан метод оценки триботехнических параметров такого контакта с учетом температуры и давления [4].

Экспериментальное определение касательных напряжений, возникающих на границе раздела ТСП-твердое тело, проводилось в условиях, максимально приближенных к реальным условиям на контакте ТСП-твердое тело. Для этого шаровой индентор, жестко закрепленный в оправке, сжимался между плоскими образцами с нанесенным ТСП на рабочие поверхности и вращался относительно оси симметрии, перпендикулярной плоскостям образцов. При этом усилии, необходимом для вращения индентора, обусловлено средними касательными напряжениями, возникающими на границе раздела ТСП-твердое тело.

Экспериментальные исследования триботехнических свойств ТСП в сопряжении вал с ТСП-втулка в условиях высоких температур проводились на специально разработанной [5] высокотемпературной установке МТП-6. 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 мо-

дулях одновременно антифрикционные свойства и износостойкость ТСП в сопряжении вал-втулка в диапазоне температур от 20 до 800°C при различных скоростях скольжения и удельных нагрузках. Погрешность измерения момента сил трения не превышает $\pm 0,7\%$.

Покрывание 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, что 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 тяжело нагруженных 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.

Из всего разнообразия ТСП для исследований выбраны высокотемпературные покрытия, широко используемые в подвижных сопряжениях машин: ВНИИ НП-209 (антифрикционный наполнитель — дисульфид молибдена (MoS_2) и связующее вещество — полимерное), ВНИИ НП-213 (дисульфид молибдена (MoS_2) и полимерное связующее), ВНИИ НП-229, ВНИИ НП-504 (дисульфид молибдена (MoS_2) и силикат натрия (Na_2OSiO_2), СТС-4 (графит и силикат натрия (Na_2OSiO_2)), ЦВСП-3с (графит, окись кадмия (CdO) и кремнийорганическое (КО-815)), Моликот 321R (дисульфид молибдена и неорганическое связующее), Моликот 3400А (графит и термостойкая смола и присадки), никель-графитовые широко используемые в подвижных сопряжениях машин. Шаровые инденторы были изготовлены из шарикоподшипниковой стали ШХ15, сплава на никелевой основе

ХН55ВМКЮ, хромистой стали 9Х18, твердого сплава ВК6М. Материалы образцов для нанесения ТСП представляли разные группы металлов: конструкционная сталь 45, нержавеющая сталь аустенитного класса IX18Н10Т, высоколегированная хромистая сталь 40Х, жаропрочные сплавы на никелевой основе ХН55ВМКЮ, ХН60ВТ, ЭП718ВД, жаростойкий сплав на основе железа и никеля аустенитного класса ЭИ415Ю, титановый сплав ВТ9, инструментальная сталь У8. Выбор этих материалов объясняется тем, что они часто применяются в подвижных сопряжениях, в которых используются ТСП.

Толщина исследуемых ТСП составляла (5–25) мкм. Выбор такого диапазона толщин покрытий обусловлен тем, что он соответствует толщинам покрытий в реальных сопряжениях.

Как показали выполненные исследования, достоверные данные о величине средних касательных напряжений (при различных температурах, нагрузках, диаметрах шарового индентора) получаются при 5–7-кратном повторении эксперимента, при этом вероятное отклонение не превышает $\pm(5-8)\%$. Изучение зависимости средних касательных напряжений τ_n от сжимающей нормальной нагрузки N и диаметра шарового индентора d показали, что τ_n не зависит от N и d (в условиях пластических деформаций на контакте).

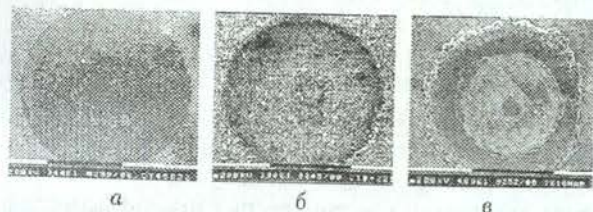


Рис. 5. Вид поверхности лунок с различной толщиной ТСП δ : 10 мкм (а); 15 мкм (б); 25 мкм (в)

Большой интерес представляет оценка влияния толщины ТСП на средние касательные напряжения τ_n . Для исследования этой зависимости ТСП с толщиной от 5 до 25 мкм наносили на плоские образцы и определяли τ_n . Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что толщина ТСП в исследуемом диапазоне не оказывает существенного влияния на средние касательные напряжения. Однако следует отметить, что с ростом толщины ТСП разброс значений средних касательных напряжений увеличивается, достигая 10–25% с надежностью 0,95. Это обусловлено тем, что диаметр лунки с ростом толщины ТСП становится менее четким, так как ТСП частич-

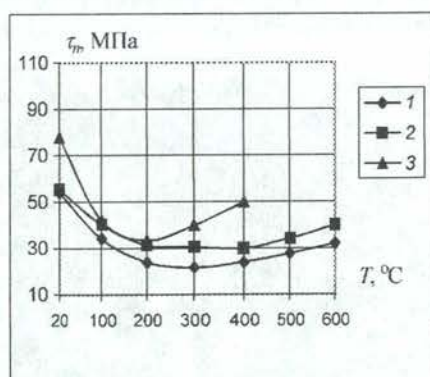
но выдавливается из зоны контакта в виде отдельных мелких, хрупких частичек (рис. 5), что затрудняет измерение диаметра лунки.

Поэтому в испытаниях в дальнейшем используются ТСП с толщиной от 8 до 10 мкм.

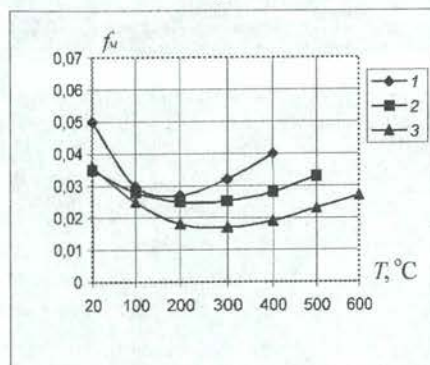
Исследования показали также, что средние касательные напряжения τ_n , обусловленные атомно-молекулярными взаимодействиями, возникающими на границе раздела ТСП–твердое тело во всем температурном интервале внешнего трения, являются функцией нормальных напряжений P_r на контакте и аппроксимируются уравнением вида

$$\tau_n = \tau_0 + \beta P_r, \quad (10)$$

где τ_n и β — фрикционные параметры, P_r — среднее давление на контакте.



а



б

Рис. 6. Зависимости средних касательных напряжений τ_n (а) и молекулярной составляющей коэффициента трения f_m (б) от температуры: индентор ШХ15; подложка — 1Х18Н10Т; покрытия: 1 — СТС-4, 2 — ЦВСП-3с, 3 — ВНИИНП-229

Зависимости средних касательных напряжений и молекулярной составляющей коэффициента трения от температуры (рис. 6) ТСП–твердое тело представляют собой сложные кривые.

Полученные зависимости средних касательных напряжений и молекулярной составляющей коэффициента трения во всем

исследованном диапазоне температур для исследованных покрытий ВНИИНП-228, СТС-4 и ЦВСП-3с имеют одинаковый характер.

Эти зависимости условно можно разбить на три характерные зоны. Зона I от нормальной температуры и до 100°C — для покрытия ВНИИНП-229 и до 200°C — для покрытий СТС-4 и ЦВСП-3с, в этой зоне происходит падение средних касательных напряжений. Зона II от 100 до 250°C и от 200 до 400°C соответственно — для покрытий ВНИИНП-229 и СТС-4, ЦВСП-3с, в этой зоне средние касательные напряжения незначительно изменяются с изменением температуры. Этот температурный диапазон соответствует в основном оптимальным условиям работы деталей и узлов машин с ТСП при внешнем трении. Зона III от 250°C — для покрытия ВНИИНП-229 от 400°C — для покрытий СТС-4 и ЦВСП-3с и до более высоких температур. В этой зоне с повышением температуры средние касательные напряжения увеличиваются, что обусловлено в основном химическим видоизменением антифрикционного наполнителя, изменением физико-механических свойств связующего вещества с повышением температуры. Последнее связано с нарушением сплошности покрытия в контакте индентор–твердое тело с ТСП, в результате чего возникает металлический контакт образцов.

Снижение и минимум кривой зависимости средних касательных напряжений от температуры обусловлены в основном размягчением связующего вещества ТСП. В области подъема кривой существенное влияние на межатомное и межмолекулярное взаимодействие контактирующих тел оказывают продукты окисления антифрикционного наполнителя, температурная стойкость связующего вещества и материал индентора.

Для исследованных ТСП СТС-4 и ЦВСП-3с при температурах выше 350–360°C происходит рост средних касательных напряжений. При этих температурах в непосредственном контакте под индентором происходит нарушение сплошности ТСП, что соответствует потере прочностных свойств связующего вещества. Для ТСП ВНИИНП-229 рост средних касательных напряжений происходит несколько раньше: начиная со 170–180°C. Это, видимо, связано с интенсивным окислением кислородом воздуха антифрикционного наполнителя — дисульфида молиб-

дена (MoS_2) с образованием абразивного продукта — триоксида молибдена (MoO_3). Образование MoO_3 отражается на фрикционных характеристиках ТСП.

Результаты исследования триботехнических характеристик при использовании ТСП ВНИИНП-209, ВНИИНП-213 и ВНИИНП-504 на основе полимерных связующих представлены на рис. 7.

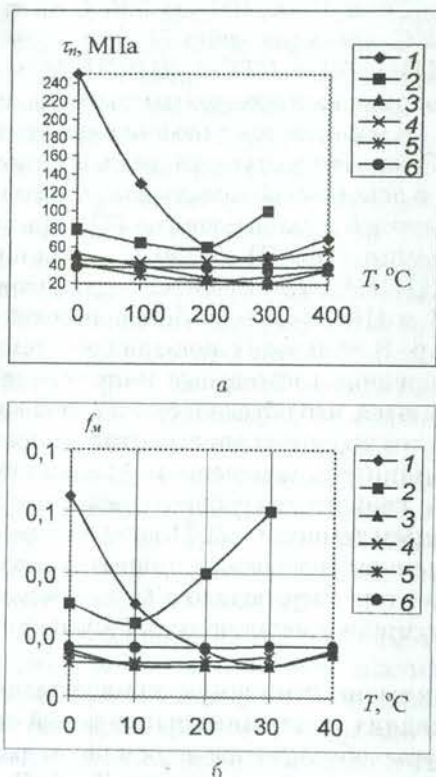


Рис. 7. Касательные τ_n напряжения на контакте (а) и молекулярная составляющая коэффициента трения f_m (б) в зависимости от температуры: 1 — покрытие (графит с полимерным связующим) на ЭП-718; 2 — ВНИИНП-213 на стали 40X; 3 — Моликот 321R на ВТ-9; 4 — ВНИИНП-504 на ЭИ-415Ю; 5 — ВНИИНП-209 на стали 40X; 6 — Моликот 3400А на ВТ-9

Характерным для полученных кривых средних касательных напряжений τ_n от температуры T (рис. 7, а) является наличие минимума при температурах, величины которых зависят от применяемых металлических подложек и покрытий. Например, для покрытий ВНИИНП-209 и ВНИИНП-213 на стали 40X минимальные значения τ_n получены при температуре около 180°C. Однако наблюдается существенная разница в величине касательных напряжений при использовании указанных испытуемых образцов, что объясняется различной твердостью используемых покрытий.

Покрытия ВНИИНП-209 и ВНИИНП-213 состоят из одних и тех же компонентов и различаются соотношением твердой фазы и связующего (в первом случае 1:1, во втором — 1:3), что определяет более высокую твердость покрытия ВНИИНП-213. Влияние твердости покрытий на величину τ_n также отмечено при испытаниях зарубежных покрытий Моликот 3400 А (дисульфид молибдена, термостойкая смола и присадки) и Моликот 321 R (дисульфид молибдена и неорганическое связующее) на сплаве ВТ-9. Покрытия Моликот имеют различный характер зависимостей относительной твердости от температуры, который соответствует характеру изменения касательных напряжений на контакте при изменении температуры и использовании указанных покрытий на сплаве ВТ-9.

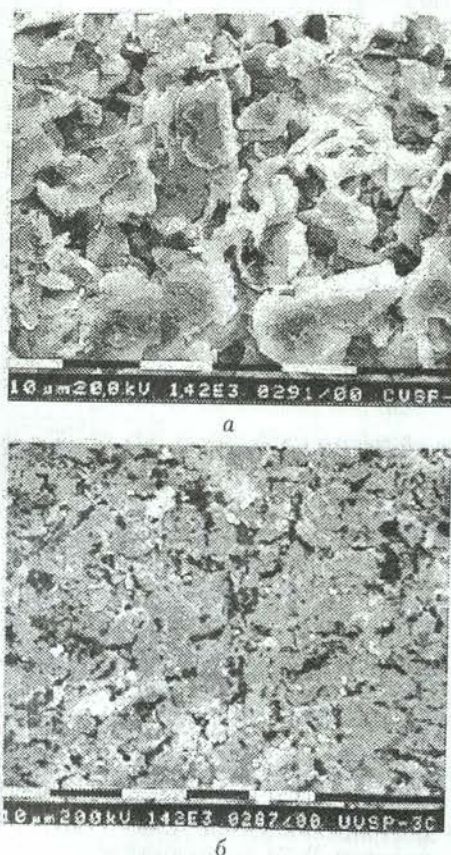


Рис. 8. Поверхность ТСП ЦВСП-3с ($\times 1420$): а — исходная; б — 470°C после приложения нагрузки

Детальное изучение поверхностей лунки с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM-505 (рис. 8) выявило соответствующие различия в морфологии поверхности ТСП в лунках. Полученные снимки свидетельствуют о том, что исходная поверхность ТСП является «рыхлой», после

приложения нагрузки на систему индентор–плоский образец с ТСП покрытие уплотняется.

Для ТСП ВНИИНП-229 с повышением температуры происходит окисление MoS_2 до MoO_3 . По внешнему виду MoO_3 представляет собой кристаллический порошок белого цвета. При температурах 170–180°C происходит интенсивное окисление MoS_2 . Визуальный осмотр поверхности плоского образца с ТСП ВНИИНП-229 показал, что поверхность образца при температурах 380°C и выше меняет цвет на светло-серый. На поверхности лунок всех исследованных ТСП при температурах более 470°C появляются трещины. Исследование поверхности лунок на плоских образцах с ТСП показало, что во всем исследованном температурном диапазоне в процессе внешнего трения лунки имеют геометрически правильную форму. Экспериментальные данные характеризуются стабильностью $\pm(2-5)\%$ при надежности 0,95. При температурах до 75°C характерно незначительное налипание ТСП на поверхность шарового индентора, о чем свидетельствуют «следы» отдельных пятен в лунке и на поверхности индентора. Поверхности лунки незначительно отличаются от самой поверхности ТСП. При температурах более 100°C поверхность лунки становится блестящей, гладкой, и с повышением температуры более 200°C «блеск» увеличивается.

Исследования влияния материала контртела (индентора) на средние касательные напряжения показали, что материалы инденторов, проявляющие различную степень окисления, оказывают определенное влияние на величину средних касательных напряжений для пары индентор–твердое тело с ТСП в условиях высоких температур.

Результаты экспериментальных исследований τ_n от P_T при различных температурах, обработанные по способу наименьших квадратов, позволили представить изменение параметров τ_n и P_T от температуры.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что для исследованных ТСП характер изменения параметров τ_0 и β от температуры примерно одинаков, как это показано, например, на рис. 9.

Установлено, что с повышением температуры вначале наблюдается уменьшение значений параметров τ_0 и β . При этом для ТСП ВНИИНП-229 и СТС-4 параметр τ_0 с повышением температуры до 100°C изменяется более интенсивно, чем для ТСП ЦВСП-3с.

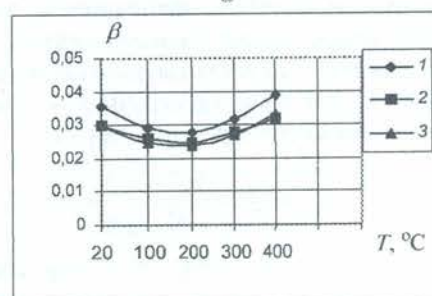
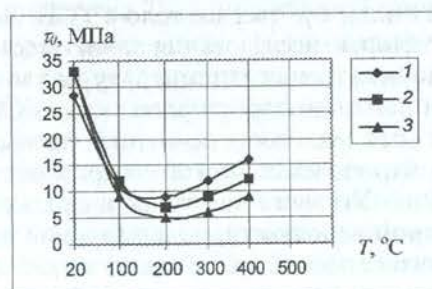


Рис. 9. Зависимость τ_0 (а) и β (б) от температуры: покрытие ВНИИНП-229; индентор: 9Х18 (1), ХН55ВМКЮ (2), ШХ15 (3)

С дальнейшим повышением температуры изменение параметра τ_0 происходит с одинаковой интенсивностью для всех исследованных ТСП. При этом в области интенсивного окисления MoS_2 для покрытия ВНИИНП-229 и при нарушении сплошности ТСП в контакте для СТС-4 и ЦВСП-3с зависимость параметров τ_0 и β от температуры, снижаясь, проходит через минимум соответственно в интервале температур 170–180°C и 350–360°C. Увеличение параметров τ_0 и β не нарушает прямолинейной зависимости изменения средних касательных напряжений от нормальных. Полученные зависимости фрикционных параметров τ_0 и β от температуры позволяют прогнозировать фрикционные свойства ТСП (в том числе коэффициент трения) для реальных подвижных сопряжений, используя теорию фрикционного взаимодействия шероховатых тел. Разброс экспериментальных данных для всех исследуемых ТСП отличался стабильностью (5–10)% при надежности 0,95.

КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ В СОПРЯЖЕНИИ «ВАЛ С ТСП–ВТУЛКА» И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СОПРЯЖЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Физическая природа коэффициента трения трибосопряжений с ТСП исследовалась на физической модели единичного фактического контакта, т. е. на подвижной паре сфери-

ческий индентор—твердое тело с ТСП. Экспериментальные исследования зависимости коэффициента трения от температуры для пары единичный индентор—твердое тело с ТСП показали справедливость основного положения молекулярно-механической теории внешнего трения. Установлено, что при скольжении единичной неровности, моделируемой в виде шарового сегмента, по пластически деформируемому полупространству с ТСП экспериментальные значения коэффициента трения f хорошо коррелируют со значениями f , полученными в результате суммирования молекулярной f_m и деформационной f_d составляющих коэффициента трения (рис. 10):

$$f = f_m + f_d = \frac{\tau_n}{P_r} + \frac{0,31}{R} \frac{N}{\text{HB}^{1/2}}, \quad (11)$$

где R — радиус индентора, N — нормальная нагрузка на индентор, HB — твердость материала подложки по Бринеллю.

Молекулярную и деформационную составляющие коэффициента трения вычисляли по результатам экспериментальных исследований зависимости τ_n и твердости HB от температуры.

Экспериментальные исследования влияния температуры на триботехнические свойства ТСП в подшипнике скольжения в диапазоне изменения температур от нормальных до 550°С проводили на разработанной нами высокотемпературной установке МТП-6.

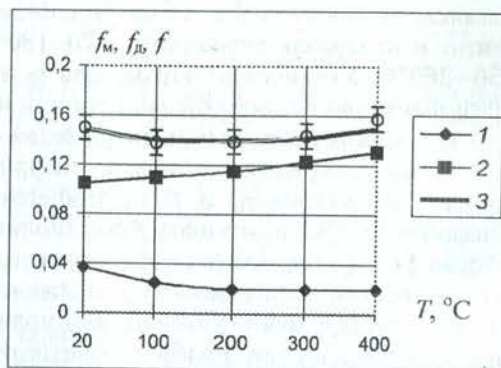


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения и его составляющих от температуры: покрытие СТС-4; нагрузка 4,9 кН; подложка 1X18H10T; 1 — молекулярная составляющая коэффициента трения, 2 — деформационная составляющая коэффициента трения, 3 — общий коэффициент трения

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. 11) предложенная формула (9) определения коэффициента трения в сопряжении вал с ТСП—штулка при высоких температурах. 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.

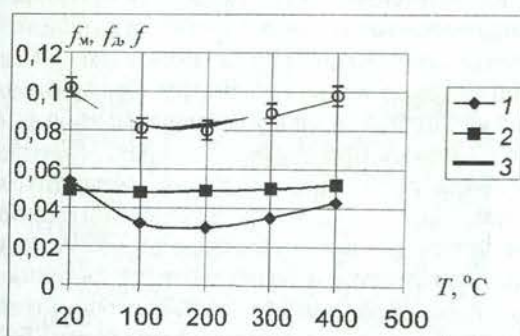


Рис. 11. Зависимость коэффициента трения и его составляющих от температуры: вал ХН60ВТ, втулка ХН55ВМКЮ, покрытие ВНИИНП-229; составляющие коэффициента трения: 1 — молекулярная, 2 — деформационная, 3 — общий коэффициент трения

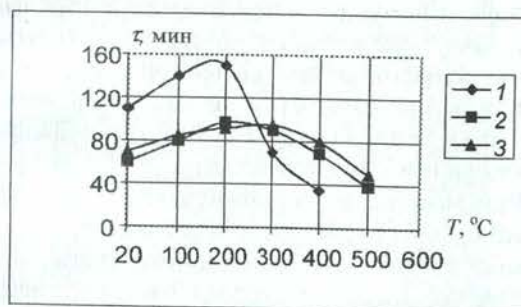


Рис. 12. Зависимость работоспособности ТСП от температуры: покрытие ВНИИНП-229 (1), СТС-4 (2), ЦВСП-3с (3); вал ХН60ВТ; втулка ХН55ВМКЮ; ($P = 55$ МПа)

Анализ долговечности работы сопряжения вал с ТСП—штулка (рис. 12) 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.

Для ТСП ВНИИНП-229 это соответствовало температуре 180°C , а ТСП СТС-4 и ЦВСП-3с — $(250-280)^{\circ}\text{C}$. 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.

Значения этих температур можно прогнозировать по результатам триботехнических исследований коэффициента трения.

ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЫХ ПОКРЫТИЙ НА СОВМЕСТИМОСТЬ ОБРАБАТЫВАЕМЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Появление задира при трении связано главным образом с наступлением порога внешнего трения. В условиях наличия пластических деформаций на контакте внешнее трение для сферической модели неровностей невозможно при выполнении соотношения [3]

$$\frac{h}{r} + \frac{\tau_{nn}}{c\sigma_T} \geq \frac{1}{2}, \quad (12)$$

где h — глубина внедрения неровности, r — радиус округления неровности, τ_{nn} — прочность на срез адгезионных связей при наличии пластических деформаций на фрикционном контакте, $c\sigma_T$ — кратковременный предел текучести материала контактирующих тел с учетом упрочнения материала от пластической деформации.

Можно принять $c\sigma_T = P_{rH}$, где P_{rH} — предельные нормальные напряжения, которые выдерживает контакт.

Как показали измерения, относительное внедрение индентора $\frac{h}{r}$ для группы материалов, близких по физико-механическим свойствам, изменяется незначительно, тогда о совместимости трущихся поверхностей исследуемых пар можно судить по отношению

$$\frac{\tau_{nn}}{P_{rH}} \geq (0,5 - K_1), \quad (13)$$

где $h/r = K_1$.

Фрикционная пара, обеспечивающая в рассматриваемых условиях меньшее значение τ_{nn}/P_{rH} , обуславливает меньшую вероятность появления повреждений на трущихся поверхностях и является более благоприятной по совместимости.

Температура $T_{\text{порс}}$, при которой появляется задира на более мягком из контактирующих тел (она соответствует максимуму отношения τ_{nn}/P_{rH}), названа температурой порога совместимости.

Влияние износостойких покрытий исследовали на образцах из сплавов ЖС6У, Т14К8 и ВК8, на которые ионно-плазменным способом на установке «Булат» были нанесены покрытия из нитрида циркония (ZrN), а также из карбонитрида титана TiCN.

Влияние порошка нитрида бора (BN) на фрикционные параметры рассматривали в сочетании с инденторами из сплавов ЖС6У и ВК8, твердосмазочные покрытия Моликот 321R и никель-графитовое (без дополнительного и после дополнительного обжата) наносили на образцы из ЖС6У.

Исследования показали, что значения τ_{nn} , соответствующие наличию пластических деформаций на фрикционном контакте, зависят от предельных нормальных напряжений P_{rH} , величины τ_0 и коэффициента β . По мере изменения температуры T контакта эти параметры меняются, предопределяя характер зависимостей $\tau_{nn} = f(T)$ и $\tau_{nn}/P_{rH} = f(T)$. В большинстве случаев с повышением температуры T , начиная с $700-900^{\circ}\text{C}$, величины τ_0 и β уменьшаются в полном соответствии с гидродинамической аналогией. Предельные нормальные напряжения P_{rH} , которые выдерживают контакт в условиях наличия пластических деформаций и которые зависят в основном от твердости образцов, снижаются во всем исследованном диапазоне температур. Поэтому практически для всех исследованных контактирующих пар, начиная с $700-800^{\circ}\text{C}$, величины τ_{nn} уменьшаются. Однако τ_{nn} изменяется непропорционально изменению P_{rH} (в связи с наличием свободного члена в уравнении (10)). В результате этого зависимость $\tau_{nn}/P_{rH} = f(T)$ проходит, как правило, через максимум (рис. 13) при некоторой температуре $T_{\text{порс}}$. Наличие этой температуры объясняется интенсификацией диффузионных процессов, приводящих к изменению соотношения между пластичностью и твердостью более мягкого из контактирующих тел.

Исследования показали, что применение покрытий из нитрида циркония (ZrN) и карбонитрида титана (TiCN) не дает значительного эффекта по улучшению совместимости трущихся поверхностей, а применение покрытия из нитрида циркония (ZrN) для фрикционной пары ЖС6У (ZrN)-ВТ22 ухудшает показатель совместимости.

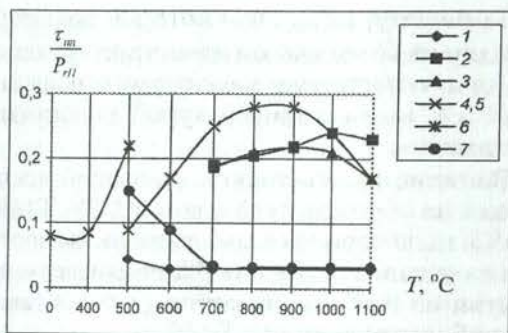


Рис. 13. Влияние температуры на параметр совместности $\tau_{тн}/P_{тн}$ при контактировании титанового сплава ВТ9: 1 — ЖС6У + никель-графитовое покрытие (после дополнительной обработки); 2 — ЖС6У (ZrN); 3 — Т14К8 (TiCN); 4 — ЖС6У + BN; 5 — ВК8 + BN; 6 — ЖС6У (Моликот 321R); 7 — ЖС6У + никель-графитовое покрытие (без дополнительной обработки)

Применение покрытий из карбонитрида титана на сплав ВК8 уменьшает вероятность схватывания лишь при температурах ниже 800°C , что, видимо, связано с присутствием в покрытиях атомов неактивного азота. При более высоких температурах сплав ВК8 обеспечивает лучшую совместимость по сравнению с ВК8 (TiCN). При этих температурах интенсифицируются диффузионные процессы и наличие в TiCN атомов титана повышает интенсивность этого процесса и прочность $\tau_{тн}$ адгезионных связей, что ведет к увеличению вероятности схватывания.

Для твердосмазочного покрытия Моликот 321R характерно наличие выраженного минимума (см. рис. 13), что, возможно, объясняется влиянием твердости покрытия на величину $\tau_{тн}$ и изменением физико-механических свойств дисульфида молибдена с повышением температуры.

Нанесение никель-графитового покрытия существенно снижает критерий $\tau_{тн}/P_{тн}$ совместности трущихся поверхностей и уменьшает вероятность схватывания. Так, в исследованном диапазоне температур $\tau_{тн}/P_{тн}$ не превышало 0,09, а при температурах 740°C и выше — 0,003, т. е. существенно ниже, чем величина, характерная для трения металлических поверхностей без смазки (0,1 и выше).

Как показали исследования, наименее интенсивно изнашиваются инструменты, на поверхности которых нанесены ТП, обеспечивающие наименьшую вероятность схватывания.

ВЫВОДЫ

1. Предложена физическая модель локального подвижного контакта поверхностей твердых тел с твердым покрытием (ТП), на основе которой создано оборудование и разработан метод оценки триботехнических параметров такого контакта с учетом температуры и давления.

2. Установлено, что совместное влияние давления, химического и структурно-фазового составов твердого смазочного покрытия (ТСП), технологических методов их нанесения и механических свойств материала подложки приводит к тому, что с повышением температуры касательные напряжения на фрикционном контакте сначала уменьшаются, затем после некоторой стабилизации начинают возрастать. Диапазон стабилизации назван критическим диапазоном температур, который связан в основном с термостойкостью материала связки.

3. Выбор материала подложки деталей трибосопрежений необходимо согласовывать с критическим диапазоном температур ТСП, чтобы избежать появления структурно-фазовых превращений в материале подложки и изменения исходных механических свойств в процессе высокотемпературной эксплуатации подвижных сопряжений.

4. На основе предложенной физической модели локального подвижного контакта с ТП разработан и апробирован метод определения фактического модуля упругости ТСП с учетом температуры и давления на контакте, физико-механических свойств материала подложки, а также того, что покрытия под нагрузкой деформируются, уплотняются и изменяют свои исходные упругие свойства.

5. Установлено, что существуют критические значения $\delta_0/R_1\varphi_0$ относительной толщины ТСП, начиная с которых при расчетном определении контактных напряжений необходимо использовать фактические значения модуля упругости ТСП. Для исследованных ТСП значения $\delta_0/R_1\varphi_0 > 8 \cdot 10^{-3}$.

6. Разработан и апробирован стенд для натурных испытаний, позволивший исследовать трибологические свойства и работоспособность ТСП в сопряжении «вал-втулка» при температурах в диапазоне $20-800^{\circ}\text{C}$, нормальных нагрузках 15–3000 Н и скоростях скольжения от 1,10–3 до 2 м/с.

7. Установлено, что подвижные сопряжения «вал с ТСП — втулка» (подшипники скольжения) обеспечивают наиболее высокую долговечность при работе в критиче-

ском 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.

8. Установлены химические составы и агрегатные состояния твердых покрытий, при которых повышается температура порога совместимости и снижается схватывание трущихся поверхностей. К этому, в частности, приводит присутствие в покрытиях в связанном состоянии атомов неактивного азота, при этом интенсивность изнашивания технологического инструмента наименьшая.

9. Результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать для машиностроительных предприятий рекомендации по проектированию и эксплуатации сопряжения «вал с ТСП-штулка» в условиях высоких температур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горячева И. Г., Добычии М. Н. Влияние покрытия на контактные характеристики радиальных подшипников скольжения // Трение и износ. 1984. Т. V, № 3. С. 124–131.
2. Криони Н. К., Шустер Л. Ш. Оценка упругих характеристик твердых смазочных покрытий с учетом температуры и давления на фрикционном контакте // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 3. С. 554–556.
3. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел. М.: Наука, 1977. 181 с.
4. Криони Н. К., Михин Н. М. Экспериментальное исследование зависимости коэффициента трения от температуры для пары единичный индентор–твердое тело с твердым смазочным покрытием // Проблемы трения и изнашивания. 1986. № 29. С. 23–28.
5. 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 АВТОРЕ



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