

УДК 621.892

Н. К. КРИОНИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ, РАЗДЕЛЕННЫХ ПЛЕНКОЙ ТВЕРДОГО СМАЗОЧНОГО ПОКРЫТИЯ, ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА

Рассмотрено влияние температуры на триботехнические свойства (касательные и нормальные напряжения на фрикционном контакте, молекулярная составляющая коэффициента трения) металлических поверхностей, разделенных пленкой твердой смазки. *Покрытие; триботехнические свойства; температура; касательные и нормальные напряжения на контакте; молекулярная составляющая коэффициента трения*

Поверхности твердых тел обычно покрыты пленками, характер 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 многие, зачастую трудно учитываемые 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 твердых смазочных покрытий (ТСП). Целью нанесения твердых пленок является придание контактирующим поверхностям деталей машин требуемых эксплуатационных свойств, таких как: износостойкость, антифрикционность, нормальная и тангенциальная жесткость, электро- и теплопроводность контакта и т. п.

В настоящее время твердые смазочные покрытия получают все большее применение, особенно в узлах трения, работающих в экстремальных условиях в силу специфичности их триботехнических свойств, отличающих ТСП от традиционных смазочных мате-

риалов. Не меньшее распространение имеют ТСП и в обычных узлах трения для упрощения их конструкции.

Исследованию триботехнических свойств ТСП посвящено много работ российских и зарубежных ученых [1–5], в которых показано, что на триботехнические свойства ТСП влияют многочисленные факторы: технологические (состав и структура 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, предусматривающие выбор материала трущейся пары, ее твердость, зазор между сопряженными деталями, условия контактирования, обеспечение хорошего теплоотвода и др.

Важнейшую роль в формировании физико-механических свойств ТСП играет структура ТСП. Вид связующего во многом определяет теплостойкость ТСП. Наибольшей теплостойкостью обладают неорганические связующие, диапазон рабочих температур которых от 20° С и до 800° С, кремнийорганические связующие работают до 300° С, а органические связующие — до 400° С [5].

На триботехнические свойства ТСП большое влияние оказывает соотношение связующего вещества с антифрикционным компонентом, их оптимальное соотношение соответствует наибольшей долговечности работы ТСП.

Работоспособность и долговечность ТСП зависят не только от специфических антифрикционных свойств твердой смазки, но и от прочности сцепления частиц этой смазки с материалом подложки, т. е. от их адгезионной способности на различных металлах и от способа нанесения покрытия. Существуют несколько принципиально различных методов нанесения покрытий: механический, физико-технический и химический, а также с помощью связующего материала. Основным недостатком покрытия со связующим является существенная зависимость его антифрикционных свойств и долговечности от свойств связующего вещества и его термической стабильности. Неадекватен и механический способ, так как слои твердых смазок непрочны и легко смываются жидкостями или удаляются при механическом воздействии. Физико-технический способ, основанный на ионно-плазменном или детонационном напылении, обеспечивает достаточную прочность и долговечность покрытия, к недостатку этого метода можно отнести ограниченную толщину получаемых покрытий. Химический способ получения пленки твердых смазок дает наиболее прочное сцепление покрытия с металлом подложки, так как в этом случае имеет место не адгезия или механическое внедрение твердой смазки, а химическая связь с металлом. Однако он не является экологически чистым.

В настоящее время в числе проблем, возникающих при разработке новых ТСП, работающих в экстремальных условиях, все большее значение приобретает проблема выбора надежных и воспроизводимых методов определения триботехнических свойств ТСП.

В данной работе, исходя из условий работы подвижных сопряжений деталей машин (радиальные и упорные подшипники скольжения, кулачковые пары и т. д.), их назначения, заданного ресурса и необходимости обеспечения требований эксплуатации, исследовались ТСП, нанесенные с помощью полимерного или металлического связующего материала, с учетом влияния одного из основных факторов — температуры — на их триботехнические характеристики (касательные τ_n и нормальные P_r напряжения на контакте, а также молекулярную составляющую коэффициента трения f_m).

В качестве исходного при выполнении данного исследования принято положение молекулярно-механической теории трения о его двойственной природе, в соответствии с которым молекулярная составляющая коэффициента трения f_m на фрикционном контакте зависит от адгезионного взаимодействия поверхностей, деформационная составляющая f_g определяется контактными деформациями шероховатых поверхностей соприкасающихся тел [6]. Известно [6], что молекулярное взаимодействие поверхностей оказывает большее влияние на величину коэффициента трения, чем деформационные процессы (отношение f_m/f_g обычно находится в пределах от 2 до 100).

Для нахождения молекулярной составляющей коэффициента трения необходимо определить касательные напряжения, возникающие в зонах фактического касания и обусловленные межатомными и межмолекулярными взаимодействиями. В данной работе для определения касательных и нормальных напряжений на фрикционном контакте использовали достаточно простой и надежный метод [7].

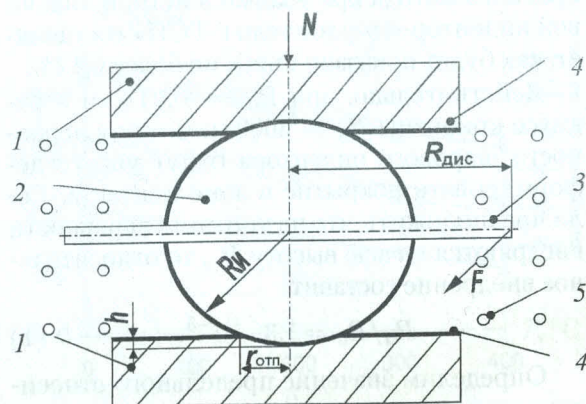


Рис. 1. Схема зоны контакта «ТСП–твердое тело» при определении триботехнических характеристик: 1 — образцы; 2 — шаровой индентор; 3 — диск с тростиком для вращения; 4 — ТСП; 5 — нихромовая спираль

Экспериментальное определение касательных напряжений, возникающих на границе раздела ТСП–твердое тело, проводится в условиях, максимально приближающихся к условиям на контакте ТСП–твердое тело [8]. Для этого в соответствии с выбранным способом по оценке средних касательных напряжений и молекулярной составляющей коэффициента трения были проведены испытания на специальном одношариковом трибометре, имеющем термокамеру [9]. Шаровой инден-

тор (рис. 1), жестко закрепленный в оправке, сжимается между плоскими образцами с нанесенным ТСП на рабочие поверхности и вращается относительно оси симметрии, перпендикулярной плоскостям образцов. Нагрев плоских образцов и шарового индентора осуществляется от нихромовой спирали, которая уложена в специальные винтовые пазы, выполненные во внутренней полости термокамеры. Температура контролируется хромель-алюмелевой термопарой, установленной на поверхности образца.

При этом сила F , необходимая для вращения индентора, обусловлена средними касательными напряжениями, возникающими на границе раздела ТСП–твердое тело.

Поверхности шаровых инденторов, изготовленных из сплавов ВК6М и ШХ15, обрабатывались с высокой шероховатостью поверхности (R_a не выше 0,04 мкм). Это сводит до минимума деформирование материала ТСП, нанесенного на плоский образец, и максимально приближает площадь отпечатка к фактической площади касания. Как показали специальные исследования, погрешность при определении молекулярной составляющей коэффициента трения с помощью выбранного метода при взаимодействии «шаровой индентор–твердое тело с ТСП» составляет, как будет показано ниже, не более 0,12%.

Действительно, при $R_a = 0,04$ мкм и радиусе кривизны $R_u = 3000$ мкм микронеровности шарового индентора будут упруго деформировать покрытие в зоне контакта. Если предположить, что на контакте неровности внедряются на всю высоту R_a , то относительное внедрение составит

$$R_a/R_u = 1,3 \cdot 10^{-5}. \quad (1)$$

Определим значение предельного относительного внедрения индентора, соответствующего упругому контакту, по формуле [10]

$$h/R_u = 2,4(1 - \mu^2)^2 (HB/E)^2, \quad (2)$$

где h — глубина внедрения; R_u — радиус индентора; μ — коэффициент Пуассона; HB — твердость по Бринеллю; E — модуль упругости. Учитывая, что для исследуемых ТСП $HB \sim 21$ МПа, $E \sim 1,4 \cdot 10^2$ МПа [4, 11], получим, что материал покрытия будет деформироваться упруго при $h/R_u = 0,04$. Сравнивая полученное значение со значением (1), можно видеть, что оно существенно его превосходит. Поэтому сделанное выше предположение об упругом деформировании покрытия микронеровностями шарового индентора в зоне отпечатка справедливо.

Деформационная составляющая коэффициента трения при упругом контакте, согласно [7], определяется выражением

$$f_g = 0,4(\alpha_{эф}/K_1\nu(\nu - 1)) \times \times 2,4^{1/3}(1 - \mu) \frac{HB}{E}, \quad (3)$$

где $\alpha_{эф}$ — коэффициент гистерезисных потерь при сложном напряженном состоянии; K_1 — константа интегрирования, зависящая от ν , параметра опорной кривой [12].

Подставляя необходимые величины в формулу (3) и приняв ориентировочно $\alpha_{эф} \sim 0,1$, получим, что в случае взаимодействия «ТСП–шаровой индентор», $f_g = 3,2 \cdot 10^{-5}$. Как будет показано ниже, наименьшее значение молекулярной составляющей коэффициента трения для исследуемых покрытий равно 0,026, таким образом, f_g составляет величину порядка 0,12% от f_m . Следовательно, данный способ позволяет с достаточной степенью точности выделить и оценить молекулярную составляющую коэффициента трения, пренебрегая деформационным компонентом, а найденные значения средних касательных напряжений будут обусловлены межатомными и межмолекулярными взаимодействиями на границе раздела «ТСП–шаровой индентор» в зоне контакта.

Для работы были выбраны ТСП с различными типами связующих и твердых антифрикционных наполнителей: ВНИИНП-209, ВНИИНП-213, ВНИИНП-504, Моликот 321R, Моликот 3400А (дисульфид молибдена и полимерное связующее), покрытия из графита и полимерного связующего и никельграфитовое (графит и металлическое связующее). Образцы пластин с пленками указанных покрытий были изготовлены из разных конструкционных материалов: 40Х, ЭП718 ВД, ЭИ415Ю, ВТ-9. Формирование пленок покрытий на пластинах производилось в соответствии с имеющимися рекомендациями в нормативно-технической документации.

Величина нагрузки на узел трения выбиралась из условий обеспечения пластической деформации в зоне трения плоских образцов. Относительное внедрение индентора, как показали измерения, не превышало значений 0,12–0,15.

Большой интерес представляет влияние толщины ТСП на средние касательные напряжения τ_n . Для исследования этой зависимости ТСП наносили на плоские образцы с

толщиной от 5 до 25 мкм и определяли τ_n . Результаты исследований 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 $\alpha = 0,95$. Это обусловлено тем, что диаметр лунки с ростом толщины ТСП становится менее четким, так как ТСП частично выдавливается из зоны контакта в виде отдельных мелких, хрупких частичек, что затрудняет измерение диаметра лунки. Поэтому в испытаниях в дальнейшем используются ТСП с толщиной от 8 до 10 мкм.

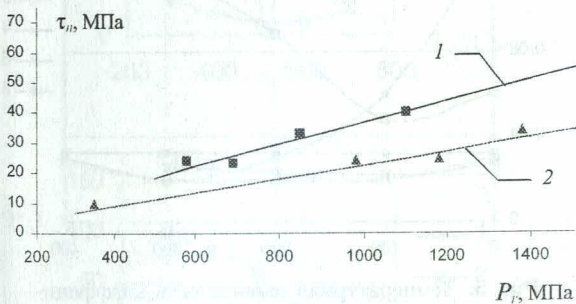


Рис. 2. Зависимость средних касательных напряжений τ_n от нормальных P_n : 1 — покрытие Моликот 321R; 2 — покрытие ВНИИНП-209

С целью определения зависимости средних касательных напряжений, обусловленных межзатомными и межмолекулярными взаимодействиями, от нормальных напряжений на контакте, для исследуемых ТСП были проведены специальные исследования по так называемому способу «сменных подложек» [7]. Сущность способа заключается в том, что сферический индентор сжимается между плоскими образцами, на которые нанесены исследуемые материалы в виде тонких пленок, толщина которых должна быть такой, чтобы ее механические свойства не влияли на средние нормальные напряжения на контакте, обусловленные механическими свойствами подложки. В этом случае выполняется условие постоянства контактирующих материалов при изменении средних нормальных напряжений на контакте. Изменяя средние нормальные напряжения за счет материала подложек, можно получить зависимость средних касательных напряжений от нормальных для материала покрытия. В данном случае на подложку наносили исследуемые ТСП толщиной 8–10 мкм. Материалами под-

ложек были: стали 45, 1X18H10T и У8, сплавы ХН55БМКЮ и ХН60ВТ. Таким образом, выполняется условие постоянства контактирующих материалов при изменении средних нормальных напряжений на контакте. Как показали исследования, средние касательные напряжения, обусловленные межзатомными и межмолекулярными взаимодействиями, являются функцией нормальных напряжений на контакте при различных температурах. Зависимость средних касательных напряжений от нормальных (рис. 2) носит прямолинейный характер.

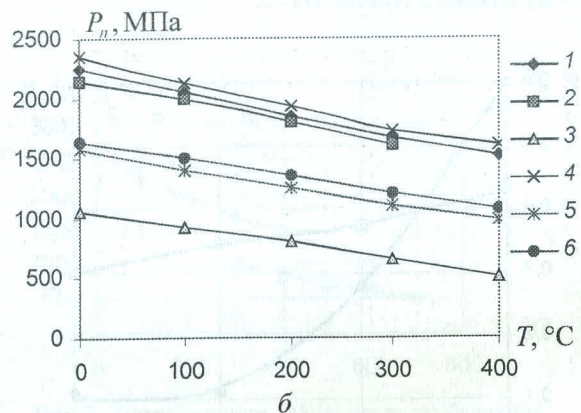
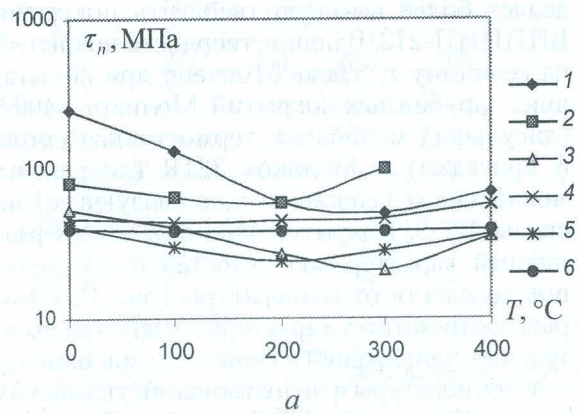


Рис. 3. Касательные (а) τ_n и нормальные (б) P_n напряжения на контакте в зависимости от температуры: 1 — покрытие (графит с полимерным связующим) на ЭП-718; 2 — ВНИИНП-213 на стали 40X; 3 — Моликот 321R на стали ВТ-9; 4 — ВНИИНП-504 на стали ЭИ-415Ю; 5 — ВНИИНП-209 на стали 40X; 6 — Моликот 3400А на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

Результаты исследования триботехнических характеристик при использовании ТСП на основе полимерных связующих представлены на рис. 3 в виде зависимостей касательного и нормального напряжений на контакте от температуры. Характерным для полученных кривых средних касательных напряжений τ_n от температуры (T) (рис. 3, а) является наличие выраженного минимума при тем-

пературах, 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°С. Однако наблюдается существенная разница в величине касательных напряжений при использовании указанных испытуемых образцов, что объясняется различной твердостью примененных 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 3400А (дисульфид молибдена, термостойкая смола и присадки) и Моликот 321R (дисульфид молибдена и неорганическое связующее) на сплаве ВТ-9. Покрытия Моликот имеют различный характер зависимостей относительной твердости от температуры (рис. 4), который соответствует характеру изменения касательных напряжений на контакте при изменении температуры и использовании указанных покрытий на сплаве ВТ-9.

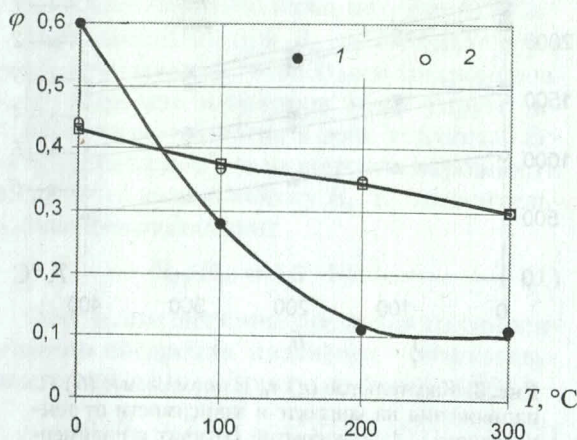


Рис. 4. Относительная твердость покрытий в зависимости от температуры: 1 — Моликот 321; 2 — Моликот 3400А

Изменение величины нормального напряжения при изменении температуры у всех испытанных образцов с покрытиями носит прямолинейный характер (рис. 3, б). На рис. 5 представлена молекулярная составляющая коэффициента трения в зависимости от температуры на контакте для всех испытанных образцов (ТСП на металлической поверхности). Наиболее высокое значение молекулярной составляющей коэффициента трения,

равное 0,13, зафиксировано в условиях трения при температуре 20°С покрытия из графита и полимерного связующего, нанесенного на сплав ЭП 718 ВД, и индентора из сплава ВК6М. Для других испытанных покрытий в паре с указанным индентором величина молекулярной составляющей коэффициента трения при температуре от 200 до 400°С была в пределах 0,020–0,035, т. е. существенно ниже, чем величина f_m , характерная для трения металлических поверхностей без смазки (0,1–0,2 и выше).

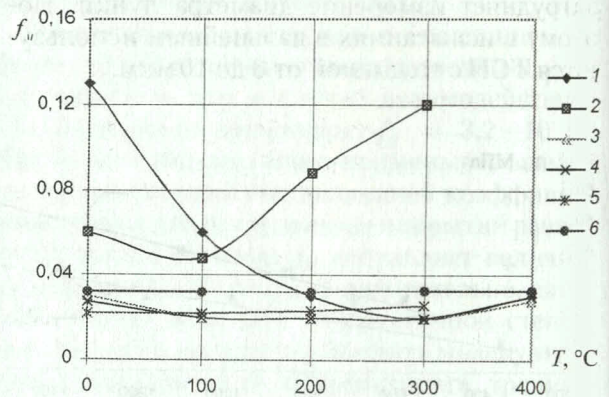


Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента трения (обозначения те же, что и на рис. 3)

Следует отметить, что касательные и нормальные напряжения на контакте, а также молекулярная составляющая коэффициента трения существенно не различались при использовании одного и того же покрытия с полимерным связующим (ВНИИНП-213) на поверхностях из разных материалов (40 X и ВТ-9), близких по своим физико-механическим свойствам (временный предел прочности, твердость и др.).

Представленные результаты получены из условия касания индентора (шара) и плоскости (пластина с покрытием) по всей поверхности отпечатка. Обоснованность этого предположения подтверждается результатами исследования контактных зон деформированного участка образцов при помощи электронной микроскопии. Установлено, что лунки на плоскости (отпечатки) после испытаний при температуре до 400°С имели геометрически правильную форму, а их поверхность — низкую шероховатость.

Практический интерес представляют также твердые смазочные покрытия с металлическими связующими. В данной работе на одношаровом трибометре [9] определены триботехнические характеристики никель-графитового покрытия, нанесенного на пластину

из сплава ЭП-708, в диапазоне температур 225–730° С. Графит, плакированный никелем по заводской технологии, наносился на поверхность пластины плазменным напылением. При испытаниях применены покрытия без дополнительной обработки после нанесения и дополнительно механически обжатые на половину линейного размера толщины пленки. Результаты определения триботехнических характеристик (τ_n , p_n , f_m) приведены на рис. 6.

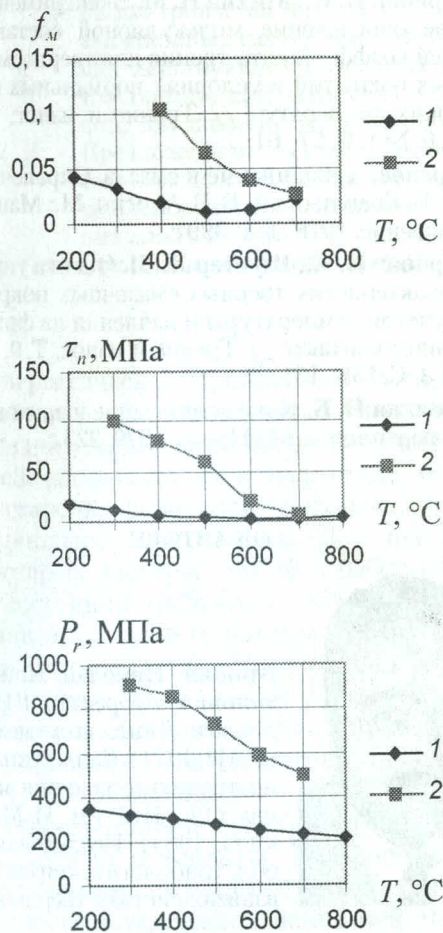


Рис. 6. Температурная зависимость триботехнических характеристик (τ_n , p_r , f_m) при трении индентора из ВК6М по никель-графитовому покрытию, нанесенному на ЭП-708 в зависимости от температуры: 1 — покрытие без дополнительной обработки; 2 — покрытие после дополнительной обработки

Нанесенное на основной материал никель-графитовое покрытие без дополнительной обработки имеет небольшую прочность, достаточно легко деформируется при нагрузке, о чем свидетельствуют низкие значения нормального напряжения на контакте. Величина нормального напряжения на контакте при использовании указанного покрытия незначительно изменяется (уменьшаясь с 331 до

200 МПа) при повышении температуры от 225 до 730° С. Следует отметить, что в указанном интервале температур значение молекулярной составляющей коэффициента трения не превышало 0,044.

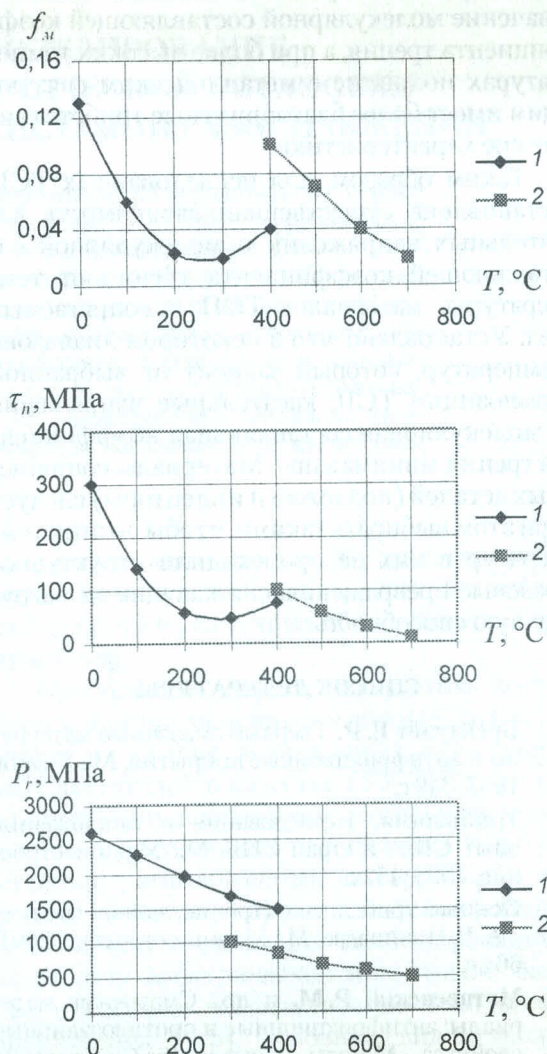


Рис. 7. Температурная зависимость триботехнических характеристик (τ_n , p_r , f_m) покрытий: 1 — графит и полимерное связующее на ЭП-718; 2 — никель-графитовое покрытие, обжатое после нанесения на поверхность

Существенное положительное влияние на триботехнические характеристики оказала дополнительная механическая обработка покрытия обжатием, увеличившая прочность и твердость покрытия. При этом отмечено более высокое значение молекулярной составляющей коэффициента трения. При температуре от 650 до 730° С триботехнические характеристики обоих рассмотренных покрытий практически одинаковы (рис. 7). Характер полученных зависимостей $f_m(T)$; $\tau_n(T)$; $p_n(T)$ для покрытий с полимерным и металлическим

связующим является практически схожим, несмотря на то, что указанные кривые лежат в разных температурных областях. В зоне температур до 500°С для практического использования более предпочтительно покрытие с полимерным связующим, имеющее меньшее значение молекулярной составляющей коэффициента трения, а при более высоких температурах покрытие с металлическим связующим имеет более благоприятные триботехнические характеристики.

Таким образом, для исследованных ТСП установлена существенная зависимость касательных напряжений и молекулярной составляющей коэффициента трения от температуры, материалов ТСП и сопрягаемых тел. Установлено, что в некотором диапазоне температур, который зависит от выбранной композиции ТСП, касательные напряжения и молекулярная составляющая коэффициента трения минимальны. Материалы сопрягаемых деталей (подложка и инденторы) следует при этом выбирать такими, чтобы до этих температур в них не происходили структурно-фазовые превращения, снижающие их нагрузочную способность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Брейтуэйт Е. Р.** Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. М.: Химия, 1967. 319 с.
2. **Трибология.** Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. М.: Машиностроение, 1993. 452 с.
3. **Основы трибологии (трение, износ, смазки)** / А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
4. **Матвеевский Р. М. и др.** Смазочные материалы: антифрикционные и противозадирные свойства. Методы испытаний: Справочник. М.: Машиностроение, 1989. 224 с.

5. **Сентюрехина Л. Н., Опарина Е. М.** Твердые дисульфид-молибденовые смазки. М.: Химия, 1966. 151 с.
6. **Крагельский И. В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
7. **Михин Н. М.** Трение в условиях пластического контакта. М.: Наука, 1968. 104 с.
8. **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.
9. **Криони Н. К., Михин Н. М.** Экспериментальное определение молекулярной составляющей коэффициента трения для твердосмазочных покрытий в условиях нормальных и высоких температур // Трение и износ. 1985. Т. 6, № 1. С. 57–61.
10. **Трение, изнашивание и смазка.** Справочник / И. В. Крагельский, В. В. Алисин. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. 399 с.
11. **Криони Н. К., Шустер Л. Ш.** Оценка упругих характеристик твердых смазочных покрытий с учетом температуры и давления на фрикционном контакте // Трение и износ. Т. 9, 1988. № 3. С. 158–161.
12. **Демкин Н. Б.** Контактное шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1979. 223 с.

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.