

Н. К. Криони

**ФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ,  
РАЗДЕЛЕННЫХ ПЛЕНКОЙ ТВЕРДОГО СМАЗОЧНОГО ПОКРЫТИЯ**

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

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

В данном исследовании, исходя из условий работы подвижных сопряжений деталей машин, 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  $\tau_n$  и нормальные  $P_r$  напряжения на контакте, а также молекулярную составляющую коэффициента трения  $f_M$ ).

В качестве исходного при выполнении данной работы 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 [1]. Известно [1], 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 опреде-

лить 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 [2].

Для работы были выбраны ТСП с различными типами связующих и твердых антифрикционных наполнителей: ВНИИ НП-209, ВНИИ НП-213, ВНИИ НП-504, Моликот 321 R, Моликот 3400А (дисульфид молибдена и полимерное связующее), покрытия из графита и полимерного связующего и никель-графитовое (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  $\tau_n$ . Для исследования этой зависимости ТСП наносили на плоские образцы с толщиной от 5 до 25 мкм и определяли  $\tau_n$ . 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.

С целью определения зависимости средних касательных напряжений, обусловленных межатомными и межмолекулярными взаимодействиями, от нормальных напряжений на контакте, для исследуемых ТСП были проведены специальные исследования по так называемому способу «сменных подложек» [2]. 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 подложек были: стали 45, 1Х18Н10Т 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 межатомными и межмолекулярными взаимодействиями, являются функцией нормальных напряжений на контакте при различных температурах. Зависимость средних касательных напряжений от нормальных носит прямолинейный характер.

Результаты исследования триботехнических характеристик при использовании ТСП на основе полимерных связующих представлены на рис. 1 в виде зависимостей касательного и нормального напряжений на контакте от температуры.

Характерным для полученных зависимостей средних касательных напряжений  $\tau_n$  от температуры ( $T$ ) (рис. 1, а) является наличие выраженного минимума при температурах, величины которых зависят от применяемых металлических подложек и покрытий. Например, для по-

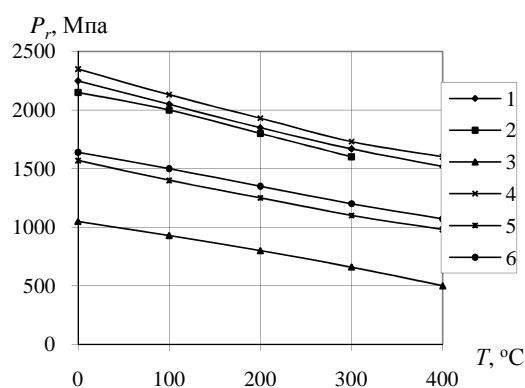
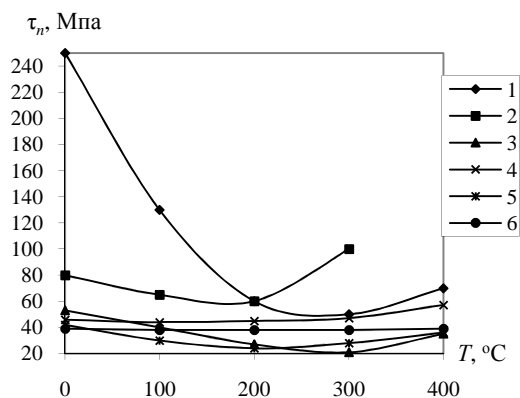
крытий ВНИИНП-209 и ВНИИНП-213 на стали 40Х минимальные значения  $\tau_n$  получены при температуре около 180 °С. Однако наблюдается существенная разница в величине касательных напряжений при использовании указанных испытуемых образцов, что объясняется различной твердостью примененных покрытий. Покрытия 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  $\tau_n$  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.

Изменение величины нормального напряжения при изменении температуры у всех испытанных образцов с покрытиями носит прямолинейный характер (рис. 1, б).

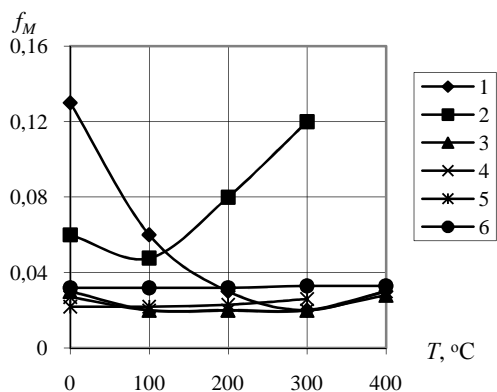
На рис. 2 представлена молекулярная составляющая коэффициента трения в зависимости от температуры на контакте для всех испытанных образцов (ТСП на металлической поверхности). Наиболее высокое значение молекулярной составляющей коэффициента трения, равное 0,13, зафиксировано в условиях трения при температуре 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).

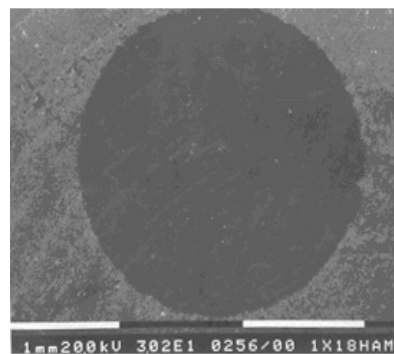
Следует отметить, что касательные и нормальные напряжения на контакте, а также молекулярная составляющая коэффициента трения существенно не различались при использовании одного и того же покрытия с полимерным связующим (ВНИИНП-213) на поверхностях из разных материалов (40Х и ВТ-9), близких по своим физико-механическим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



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



**Рис. 2.** Температурная зависимость молекулярной составляющей коэффициента трения. Обозначения те же, что и на рис. 1

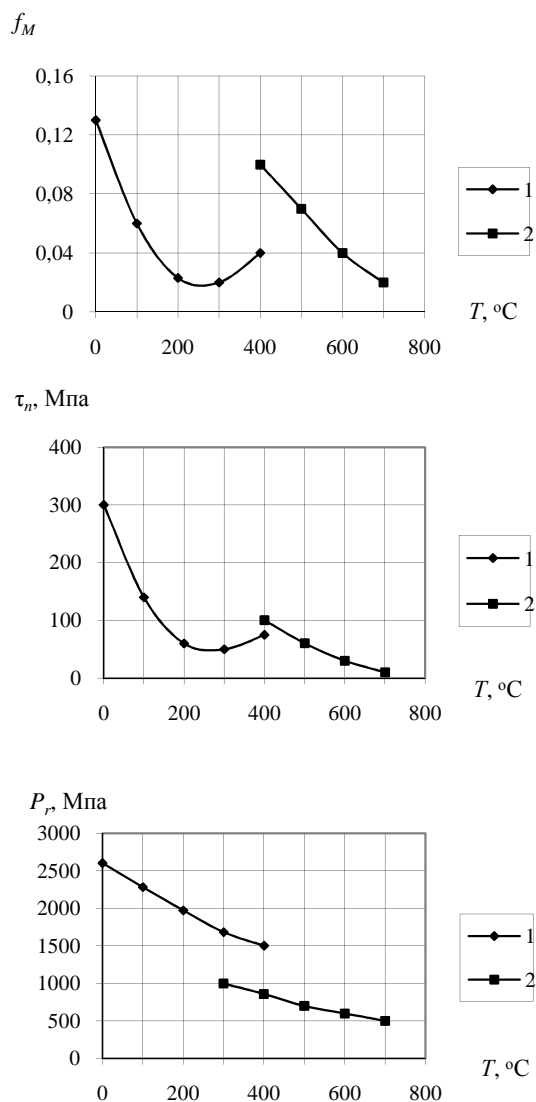


**Рис. 3.** Вид поверхности лунки  $T = 500^\circ \text{C}$  ( $\times 50$ )

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) (рис. 3) после испытаний при температуре до  $400^\circ \text{C}$  имели геометрически правильную форму, а их поверхность – низкую шероховатость.

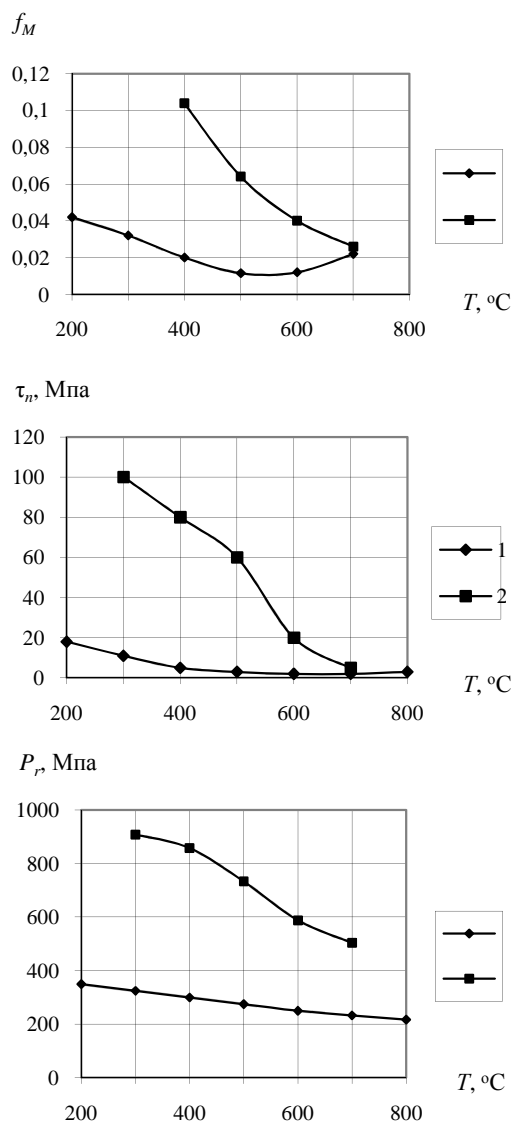
Практический интерес представляют также твердые смазочные покрытия с металлическими связующими. В данной работе на одношаровом трибометре [3] определены триботехнические характеристики никель-графитового покрытия, нанесенного на пластину из сплава ЭП-708, в диапазоне температур  $225\text{--}730^\circ \text{C}$ . 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 ( $\tau_n$ ,  $P_n$ ,  $f_r$ ) приведены на рис. 4.

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  $730^\circ \text{C}$ . Следует отметить, что в указанном интервале температур значение молекулярной составляющей коэффициента трения не превышало 0,044.



**Рис. 4.** Температурная зависимость триботехнических характеристик ( $\tau_n$ ,  $P_r$ ,  $f_M$ ) при трении индентора из ВК6М по никель-графитовому покрытию, нанесенному на ЭП-708 в зависимости от температуры дополнительной обработки: 1 – покрытие без дополнительной обработки; 2 – покрытие после дополнительного обжата

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. При температуре от 650 до 730  $^{\circ}\text{C}$  триботехнические характеристики обоих рассмотренных покрытий практически одинаковы (рис. 5).



**Рис. 5.** Температурная зависимость триботехнических характеристик ( $\tau_n$ ,  $P_r$ ,  $f_r$ ) покрытий: 1 – графит и полимерное связующее на ЭП-718; 2 – никель-графитовое покрытие, обжато после нанесения на поверхность

Характер полученных зависимостей  $f_M(T)$ ;  $\tau_n(T)$ ;  $P_r(T)$  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  $^{\circ}\text{C}$  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.

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. **Крагельский И. В.** Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 480 с.
2. **Михин Н. М.** Трение в условиях пластического контакта. М.: Наука, 1968. 104 с.
3. **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.
4. **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.

#### ОБ АВТОРЕ

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