

УДК 541.43.001

О ВЛИЯНИИ СВОЙСТВ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ СОВМЕСТИМОСТИ ПРИ ТРЕНИИ

Л. Ш. ШУСТЕР

Факультет авиационно-технологических систем УГАТУ

Тел: (3472) 23 07 34 E-mail: okmim@ugatu.ac.ru

Описана методика оценки совместимости при трении твердых металлических тел, приведены экспериментальные результаты и выполнено их обобщение с учетом физико-механических свойств контактирующих материалов и температуры контакта

Совместимость при трении; физико-механические свойства; температура контакта

ВВЕДЕНИЕ

Работоспособность современных машин и механизмов (от космических кораблей и самолетов до бытовых приборов) непосредственно связана с надежностью и долговечностью узлов, работающих с трением и износом. Поэтому триботехнические явления должны учитываться при проектировании и эксплуатации машин и механизмов. Они проявляются при контактном взаимодействии деталей в сопряжениях, в технологических процессах и во многих других случаях. Потери средств от трения и износа в развитых государствах достигают 4–5% национального дохода, а преодоление сопротивления трения поглощает во всем мире 20–25% вырабатываемой за год энергии, до 80–85% деталей машин выходит из строя по износу.

Повышение экономически и экологически целесообразной долговечности и надежность машин, технологического оборудования и инструмента непосредственно связаны с повышением износостойкости. Решение этой актуальной, практически необходимой задачи возможно только на базе глубоких, научно обоснованных рекомендаций. Управление трением, оптимизационные расчеты и рациональное конструирование узлов трения (с учетом условий эксплуатации) возможны на основании анализа математических моделей, функционально увязывающих влияние различных факторов на микро- и макроуровне.

В данной работе приведены некоторые обобщения экспериментальных результатов, позволяющие прогнозировать трение и изнашивание в тяжело нагруженных трибосопряжениях (ТНТС).

Контактирующие поверхности тяжело нагруженных трибосоединений (ТНТС) находятся в экстремальных условиях трения и изнашивания: происходит скольжение при повышенных нормальных нагрузках, скоростях и температурах. При этом на первый план выступает проблема выбора материалов с учетом их совместимости [1]. В триботехнике под совместимостью элементов трущейся пары обычно понимают способность данной пары при принятой смазочной среде или в отсутствие смазки приспособляться друг к другу в процессе взаимного перемещения, обеспечивая заданную долговечность.

1. СПОСОБ ОЦЕНКИ СОВМЕСТИМОСТИ ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Известен способ совместимости трущихся поверхностей, заключающийся в определении предельно допустимой нагрузки $P_{зад}$ до образования задира [1]. По величине этой нагрузки судят о совместимости: пара трения, обеспечивающая наибольшие значения $P_{зад}$ при заданной скорости скольжения, считается наиболее благоприятной по совместимости. Однако этот способ не позволяет получать точные результаты вследствие неполной

имитации рабочих условий и субъективного характера момента появления задира.

Известен также способ оценки совместимости трущихся поверхностей [1], заключающийся в том, что образцы из металлов трущихся деталей вводят в контакт, создают нормальную нагрузку, имитируют рабочие условия и по критериям, характеризующим взаимодействие этих образцов, судят об их совместимости. При этом имитацию рабочих условий осуществляют путем задания различной скорости скольжения между образцами трущейся пары, а за критерий совместимости принимают критическую температуру $T_{кр}$ образования задира. Недостаток этого способа заключается в длительности (трудоемкости) определения рационального сочетания пар трения, а также в снижении точности вследствие фиксации момента появления задира по визуальным наблюдениям.

Следовательно, для обеспечения более точной оценки совместимости трущихся поверхностей необходимо прежде всего разработать критерий заедания (задира), более объективный, чем визуальные наблюдения, который учитывал бы специфические условия работы ТНТС.

Известно [2], что 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 невероятно при соотношении [3]:

$$\frac{h}{r_1} + \frac{\tau_{nn}}{C\sigma_T} > \frac{1}{2}, \quad (1)$$

где h — глубина внедрения неровности; r_1 — радиус округления неровностей; $C\sigma_T$ — кратковременный предел текучести материала образцов (с учетом упрочнения от пластического деформирования); τ_{nn} — прочность адгезионных связей на срез.

В первом приближении [3]

$$C\sigma_T \approx p_{гн}, \quad (2)$$

где $p_{гн}$ — предельные нормальные напряжения, соответствующие насыщенному пластическому контакту [3].

Как показали непосредственные измерения, относительное внедрение индентора (отношение h/r_1), соответствующее напряжениям $p_{гн}$, при проведении исследований с конструкционными металлами находится в пределах 0,12 ... 0,15. Это позволяет судить о

совместимости исследуемых пар трения по отношению

$$\frac{\tau_{nn}}{C\sigma_T} \approx \frac{\tau_{nn}}{p_{гн}}, \quad (3)$$

получаемому по результатам исследований, проводимых на адгезиометре при нормальных напряжениях, равных $p_{гн}$.

Таким образом, для условий ТНТС в качестве объективного критерия совместимости трущихся поверхностей может быть принято отношение $\tau_{nn}/p_{гн}$. Тогда с учетом соотношения (1) и того, что в исследованиях $h/r_1 = 0,12 \dots 0,15$, порогом внешнего трения или условием появления задира является

$$\frac{\tau_{nn}}{p_{гн}} \geq 0,38 \dots 0,35. \quad (4)$$

Чем дальше фактическое значение отношения $\tau_{nn}/p_{гн}$ от значений 0,35 ... 0,38, тем более благоприятны условия трения; чем ближе к этим значениям, тем более вероятно появление задира. При значениях $\tau_{nn}/p_{гн} \geq 0,35 \dots 0,38$ внешнее трение невероятно, практически сразу появляется задиры на более мягком из контактирующих тел.

Это позволило разработать и апробировать способ оценки совместимости трущихся поверхностей применительно к условиям ТНТС [4]. Он заключается в том, что образцы из разных материалов вводят в контакт, прикладывают нагрузки в зоне контакта и по одному из критериев, характеризующих совместимость трущихся поверхностей — оценивают последнюю, отличающуюся тем, что с целью повышения производительности оценки после ввода в контакт нагревают и прикладывают нагрузку до пластической деформации, определяют прочность адгезионных связей, а за критерий, характеризующий совместимость трущихся поверхностей, принимают отношение прочности адгезионной связи к кратковременному пределу текучести более мягкого из контактирующих материалов при соответствующей температуре.

Фрикционная пара, обеспечивающая в рассматриваемых условиях меньшее значение $\tau_{nn}/p_{гн}$, обуславливает меньшую вероятность появления повреждений на трущихся поверхностях и является более благоприятной по совместимости.

Рассмотрим пример конкретного выполнения. Для одного материала ВКС4, находящегося в твердом состоянии (после цементации и закалки — 52...54 HRC₃), и двух более мягких состояниях (после термоулучшения — 45...48 HRC₃ и после азотирования

Таблица 1

Значения критерия совместимости при различных температурах контакта

Трущаяся пара	Температура θ , °C					
	25	75	150	180	250	285
	Отношение τ_{nn}/p_{rH}					
ВКС4 (52...54 HRC ₃) — ВКС4 (45...48 HRC ₃)	0.10	0.100	0.22	0.30	0.35	0.32
ВКС4 (52...54 HRC ₃) — ВКС4(азот, 22...25HRC ₃)	0.09	0.075	0.09	0.12	0.39	0.35

по отожженной сердцевине — 22...25 HRC₃) определяют наиболее рациональное сочетание и температуру $\theta_{порс}$ порога совместимости следующим образом. Из более твердого материала изготавливают индентор, из более мягкого — образцы. Образцы и индентор приводят в контакт, создают нормальную нагрузку до появления пластических деформаций на контакте (контролируется по образованию лунки на образцах). Для образцов с твердостью 45...48 HRC₃ это давление в зависимости от температуры изменяется в пределах 3400...2000 мПа; для образцов азотированных — в пределах 3400...1200 мПа. Затем нагревают зону контакта до исследуемой температуры и определяют величину τ_{nn} прочности адгезионной связи и соответствующее значение предельных нормальных напряжений p_{rH} по методике, изложенной в работе [5].

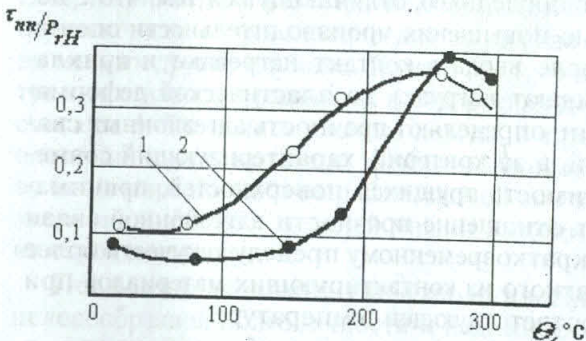


Рис. 1. Температурная зависимость параметра совместимости; индентор ВКС4 (52...54 HRC₃): 1 — ВКС4 (45...48 HRC₃); 2 — ВКС4 (азотир. 20...25 HRC₃)

Эксперименты повторяют при нескольких значениях температуры (с шагом примерно 50° C). Вычисляют отношения τ_{nn}/p_{rH} и по зависимости этого отношения от температуры нагрева (рис. 1 и табл. 1) определяют наиболее рациональную по совместимости па-

ру трения и температуру $\theta_{порс}$, соответствующую порогу совместимости.

Температура порога совместимости у этих фрикционных пар примерно одинакова $\theta_{порс}$. При температурах контакта $\theta < \theta_{порс}$ наиболее рациональной по совместимости является пара ВКС4 (52...54 HRC₃) — ВКС4 (азотирование, 22...25 HRC₃).

2. ВЛИЯНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНТАКТИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СОВМЕСТИМОСТЬ ПРИ ТРЕНИИ

В работе [6] показано, что прочность адгезионных связей на срез связана с нормальными напряжениями на контакте биномиальной зависимостью, которая для пластического контакта имеет вид

$$\tau_{nn} = \tau_0 + \beta p_{rH},$$

где τ_0 — напряжение среза при отсутствии нормальных напряжений; β — коэффициент упрочнения адгезионных связей от нормальных напряжений.

Отсюда критерий совместимости трущихся поверхностей равен

$$\tau_{nn}/p_{rH} = \tau_0/p_{rH} + \beta. \quad (5)$$

С повышением температуры контакта параметры τ_0 и p_{rH} в общем случае уменьшаются по величине; кроме того, значения параметра τ_0 существенно меньше значений p_{rH} [6]. Из этого следует, что отношение τ_0/p_{rH} не должно оказывать существенного влияния на критерий совместимости, поэтому он определяется в основном величиной параметра β , т. е.

$$\frac{\tau_0}{p_{rH}} \approx \beta. \quad (6)$$

Следовательно, температуры пороговая [6] $\theta_{пор}$ и порога совместимости $\theta_{порс}$ должны совпадать по величине. То, что это именно

Таблица 2

Сравнение значений температур $\theta_{пор}$ и $\theta_{порс}$ при контактировании с индентором P8M3K6

Трущаяся пара	Температура θ , °C					
	25	75	150	180	250	285
	Отношение $\tau_{нп}/P_{гн}$					
ВКС4 (52...54 HRC ₃) — ВКС4 (45...48 HRC ₃)	0.10	0.100	0.22	0.30	0.35	0.32
ВКС4 (52...54 HRC ₃) — ВКС4(азот, 22...25HRC ₃)	0.09	0.075	0.09	0.12	0.39	0.35

так, видно, например, из данных, приведенных в табл. 2.

Аналогичные результаты получены и для многих других фрикционных пар. Поэтому все закономерности, описанные в работе [6] по влиянию физико-механических свойств материалов контактирующих тел и технологических факторов на температуру $\theta_{пор}$ и параметр β , могут быть полностью отнесены и к температуре $\theta_{порс}$ порога совместимости, и к критерию совместимости. Следует при этом обратить особое внимание на влияние пластичности контактирующих материалов: с увеличением пластичности возрастает критерий совместимости и снижается температура $\theta_{порс}$ (см., например, на рис. 2 сравнение контактирования с ВК6М и P8M3K6), т. е. ухудшается совместимость трущихся поверхностей. Твердость материала сама по себе при $\theta < \theta_{порс}$ не оказывает существенного влияния на критерий совместимости (рис. 3), но несколько влияет на температуру $\theta_{порс}$ (см. табл. 2).

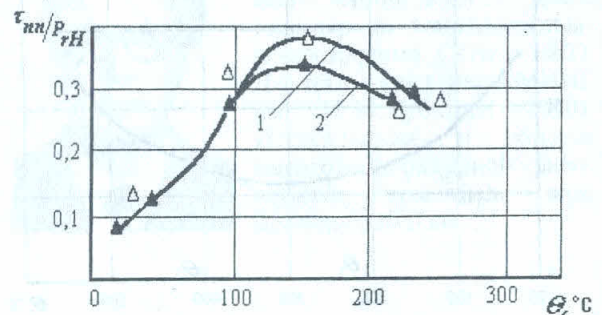


Рис. 3. Влияние температуры и твердости на критерий совместимости при контактировании с P8M3K5: 1 — 30ХГСА (45...48HRC₃); 2 — 30ХГСА (25...28HRC₃)

При контактировании и трении одноименных материалов критерий совместимости возрастает, так как при этом возрастает первый член в уравнении (5) — в связи с увеличением параметра τ_0 [6], в результате чего ухудшается совместимость трущихся поверхностей (рис. 2).

3. ВЛИЯНИЕ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ (ТСП)

При определенных режимах эксплуатации подвижных сопряжений, например, при повышенных и высоких температурах исключается использование жидких и пластичных смазочных материалов. В этих условиях широко применяют твердые смазочные материалы, которые обычно наносят на рабочие поверхности деталей в виде покрытий.

Образцы (подложки для ТСП) были изготовлены из разных материалов: конструкционная сталь 45, нержавеющей сталь аустенитного класса 1X18N10T, жаропрочные сплавы на никелевой основе ХН55ВМКЮ и ХН60ВТ, высоколегированная сталь. Исследовали высокотемпературные ТСП: СТС-4,

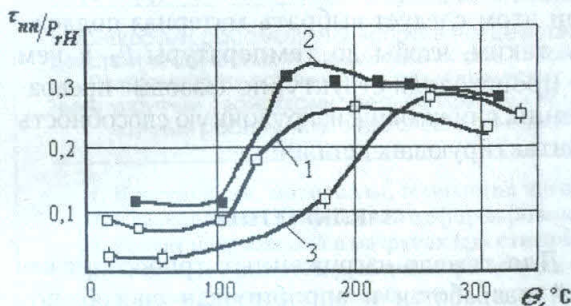


Рис. 2. Влияние температуры на критерий совместимости при контактировании с ВКС5 (45...48 HRC₃): 1 — P8M3K6; 2 — ВКС5 (56...58 HRC₃); 3 — ВК6М

ВНИИП-229, ВНИИП-504А и ЭОНИТ-3. Толщина ТСП составляла 5...25 мкм. Как показали исследования, толщина ТСП не оказывает существенного влияния на величину τ_{nn} .

При пластическом контактировании в широком диапазоне положительных температур установлено [7], что зависимость τ_{nn} от температуры θ контакта имеет три характерные зоны (рис. 4):

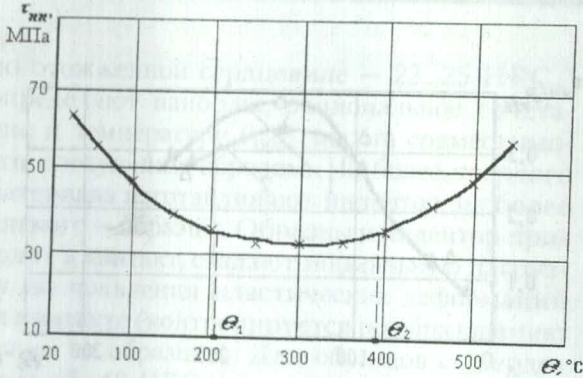


Рис. 4. Зависимость средних касательных напряжений от температуры при предельных нормальных напряжениях: индентор — 9X18; подложка — 1X18H10T; ТСП — СТС4

В первой происходит уменьшение τ_{nn} с повышением θ ; во второй τ_{nn} практически не зависит от θ ; в третьей — τ_{nn} увеличивается (и довольно интенсивно) с повышением θ . Для ТСП ВНИИП504А и ЭОНИТ-3 первая зона практически отсутствует (рис. 5).

Предельную температуру первой зоны назовем θ_1 , второй зоны τ_n — θ_2 . Значения температур θ_1 и θ_2 зависят от марки ТСП. Эксперименты показали, что для ВНИИП-229 $\theta_1 = 100^{\circ}\text{C}$; $\theta_2 = 250^{\circ}\text{C}$; для СТС-4 $\theta_1 = 200^{\circ}\text{C}$; $\theta_2 = 400^{\circ}\text{C}$; для ВНИИП-504А и ЭОНИТ-3 $\theta_2 = 600^{\circ}\text{C}$.

Исследования показали также, что при значениях температуры контакта меньше θ_2 величина τ_{nn} практически не зависит от давлений $p_{гн}$ на контакте. При $\theta > \theta_2$ величина τ_{nn} увеличивается с увеличением $p_{гн}$.

Первая и вторая зоны зависимости $\tau_{nn} = f(\theta)$ обусловлены в основном размягчением связующего вещества ТСП. Этот температурный диапазон соответствует оптимальным условиям работы деталей и узлов машин с ТСП при внешнем трении. При температуре $\theta > \theta_2$ изменяются физико-механические свойства связующего вещества, что

приводит к нарушению сплошности покрытия, в результате чего возникает металлический контакт, т. е. действие ТСП прекращается.

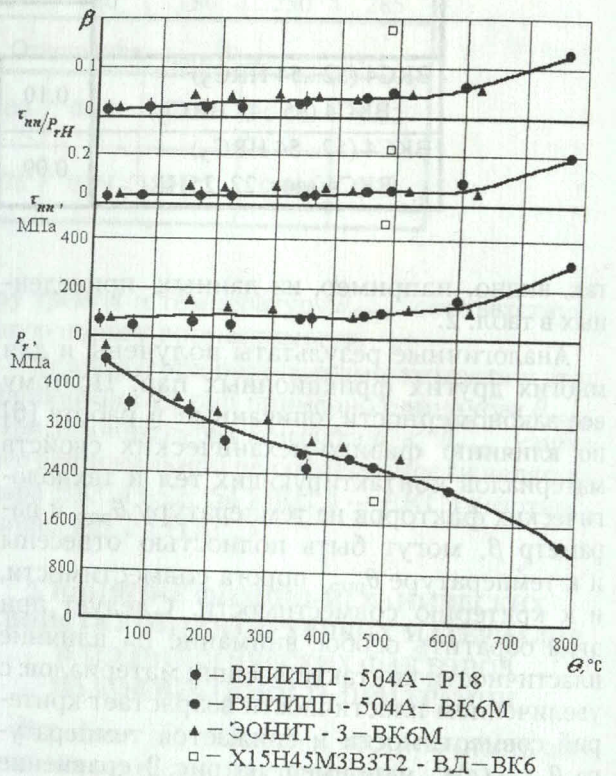


Рис. 5. Зависимость фрикционных характеристик от температуры

Сравнение значений τ_{nn} , полученных с применением и без применения ТСП, указывает на существенное (почти в 10 раз) снижение фрикционных сил при использовании ТСП. В результате этого значительно улучшается совместимость трущихся поверхностей. Кроме того, исследования показали, что применение таких ТСП, как ВНИИП-504А и ЭОНИТ-3, позволяет повысить рабочую температуру трения до 600°C (рис. 5). Но при этом следует выбрать материал подложки таким, чтобы до температуры θ_2 в нем не происходили структурно-фазовые превращения, снижающие нагрузочную способность контактирующих деталей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для тяжело нагруженных трибосопряжений разработан и апробирован способ, позволяющий оценить совместимость трущихся поверхностей не только в экстремальных, но и в различных других условиях. Установлено, что уменьшение пластичности и повышение твердости контактирующих тел улучша-

ют показатели совместимости трущихся поверхностей. Еще более ощутимо влияет на эти показатели применение твердых смазочных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981, 128 с.
2. Основы триботехники (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов / Под ред. А.В. Чичинадзе М.: Наука и техника, 1995. 778 с.
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбаров В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
4. А.с. 1335851 (СССР). Способ оценки совместимости трущихся поверхностей / Л.Ш. Шустер, В.С. Новиков, Ю.М. Павленко, В.М. Хихлин // Б.И. 1987. № 33.
5. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом. М.: Машиностроение, 1988. 96 с.

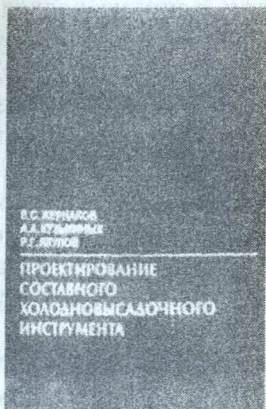
6. Шустер Л.Ш. Новый подход к решению проблемы оптимизации трения и изнашивания при повышенных температурах контакта // Сб. тр. УАИ. Ч. II. Уфа, 1992. С. 47-58.
7. Криони Н.К., Шустер Л.Ш. Оценка упругих характеристик твердых смазочных покрытий с учетом температуры и давления на фрикционном контакте // Трение и износ. Минск: Наука и техника, 1988. Т. 9, вып. 3. С. 554-556.

ОБ АВТОРЕ

Шустер Лева Шмульевич, профессор кафедры основ конструирования механизмов и машин УГАТУ. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УАИ, 1962). Д-р техн. наук (защ. в МИНГ им. И.М. Губкина, 1990). Исследования в области высокотемпературной триботехники, в том числе – при механообработке.



Информация



В.С. Жернаков, А.А. Кузьминых, Р.Г. Якупов **Проектирование составного** **холодновысадочного инструмента**

М.: Машиностроение, 1999

221 с. ISBN 5-217-02961-7

Рецензенты:

ОАО «Автономаль», техн. директор канд. техн. наук Д. М. Закиров,
кафедра обработки металлов давлением МИСИС,
зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. О. М. Смирнов

В монографии рассмотрены напряженно-деформированное состояние составных цилиндров и матриц при действии статических и динамических сил, а также тепловые процессы при холодной объемной штамповке. Показаны пути оптимизации геометрических размеров многослойных матриц из материалов с различными упругими свойствами, твердосплавными вставками. Для инженеров-машиностроителей, будет полезна научным работникам, а также аспирантам и студентам старших курсов машиностроительных вузов

1. Конструкция, материалы, технология изготовления и стойкость холодновысадочного инструмента
2. Исследование напряженно-деформированного состояния составных цилиндров
3. Расчет напряжений в матрицах при статическом и динамическом нагружении
4. Тепловые процессы в матрице при холодной штамповке
5. К расчету контактных напряжений в составных конструкциях для обработки металлов давлением