

УДК 621.891:519.28

П. Н. Х о п и н

РАЗРАБОТКА И ОПРОБОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ И ОПТИМАЛЬНЫХ НАГРУЗОЧНО- СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ТРЕНИЯ СМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Приведен метод определения предельных и оптимальных нагрузочно-скоростных режимов трения смазочных покрытий. Способ реализован на примере испытаний твердосмазочного покрытия типа ВНИИ НП 212. Получены зависимости $p = f(V)$ для предельных и оптимальных режимов трения данного покрытия.

E-mail: chopinp@mail.ru

Ключевые слова: твердосмазочное покрытие, оптимальные и предельные режимы трения.

В основу способа положена определяющая зависимость предельных и оптимальных режимов трения смазочных материалов от температурного фактора [1, 2]. Известно, что выход из строя пары трения с применением смазочных материалов на предельных по нагрузочно-скоростным параметрам режимах трения обуславливается разрушением смазочной пленки вследствие высокой контактной температуры трения. Вместе с тем, оптимальные нагрузочно-скоростные режимы пары по долговечности, коэффициенту трения или другим факторам, определяющим работоспособность сопряжения, также объясняются, главным образом, благоприятным температурным состоянием контактной поверхности трения. Например, для твердосмазочных покрытий (ТСП) — это температура размягчения связующего ($\sim 100^\circ\text{C}$) [1]. Поскольку $T_{\text{тр}}$ является функцией от двух эксплуатационных факторов — контактного давления и скорости скольжения, — то, следовательно, для смазочных материалов, образующих на поверхности трения смазочную пленку, должны существовать комплексные зависимости, определяющие предельные и оптимальные сочетания указанных факторов.

Способ реализуется следующим образом (рис. 1). С помощью математических методов планирования эксперимента строят матрицу, в которой варьируемыми факторами являются значения контактного давления ($p_{\text{конт}}$) и скорости скольжения (v), а параметром оптимизации — температура трения ($T_{\text{тр}}$). Затем после приработки пары трения с испытуемым смазочным материалом на основном уровне факторов

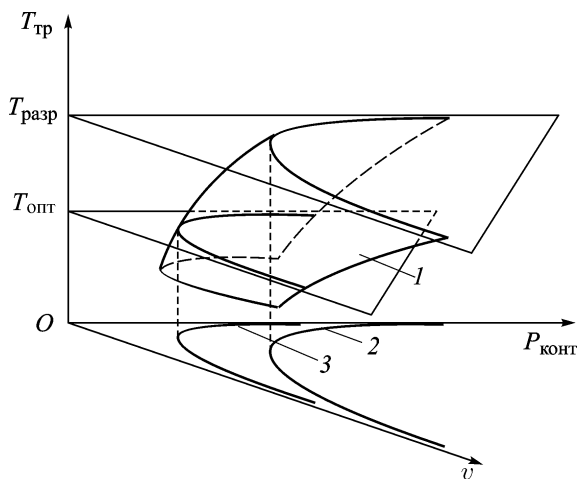


Рис. 1. Графическое решение задачи определения предельных и оптимальных нагрузочно-скоростных режимов трения смазочных материалов:

1 – температурная характеристика исследуемой пары трения по факторам $p_{\text{конт}}$ и v ; 2 – кривая предельных значений $p_{\text{пред}} = f_1(v_{\text{пред}})$; 3 – кривая оптимальных значений $p_{\text{опт}} = f_2(v_{\text{опт}})$

в процессе одного испытания факторы $p_{\text{конт}}$ и v изменяются по заданному закону и непрерывно регистрируется соответствующая им $T_{\text{тр}}$ на стационарном уровне. После математической обработки полученных данных рассчитывается уравнение поверхности отклика типа $T_{\text{тр}} = f(p_{\text{конт}}, v)$, вводя в которое оптимальную по долговечности, коэффициенту трения или другому фактору, определяющему процесс трения, температуру смазочного материала, получают соответствующие зависимости вида $p_{\text{опт}} = f(v_{\text{опт}})$, позволяющие определить для каждой v реальной пары трения предельную и оптимальную нагрузки или, наоборот, по известной нагрузке рассчитать предельную и оптимальную скорости.

Экспериментально способ был опробован при испытании ТСП ВНИИ НП 212 на установке, конструкция которой описана в работе [2]. Уровни и диапазоны варьирования факторов $p_{\text{конт}}$ и v приведены в табл. 1 (для машины трения РП).

После соответствующих преобразований искомая математическая модель, выраженная в натуральных значениях факторов, принимает вид

$$T_{\text{тр}} = 36,485 + 132,225v + 5,46 \cdot 10^{-2}N + 2,39 \cdot 10^{-2}vN - 47,94v^2 - 2,187 \cdot 10^{-5}N^2. \quad (1)$$

С учетом измеренной после опыта на контробразце площади пятна контакта уравнение (1) можно записать в универсальной форме:

$$T_{\text{тр}} = 36,49 + 132,23v + 0,535p_{\text{конт}} + 0,234p_{\text{конт}}v - 4,94v^2 - 2,094 \cdot 10^{-3}p_{\text{конт}}^2. \quad (2)$$

Уровни и диапазоны варьирования факторов в эксперименте по исследованию работоспособности пары трения с ТСП при определении температурной характеристики

Уровни факторов	Натуральные значения	
	v , м/с	N , Н
Интервал варьирования	0,4/0,8	392/560
Основной уровень	0,66/2,6	784/1000
Верхний уровень	1,06/3,4	1176/1560
Нижний уровень	0,26/1,8	392/440
Звездные точки: + 1,41 - 1,41	1,224/3,728	1337/1790
	0,096/1,472	236/210

Примечание. 1. Значения в числителе используются для определения зависимости $p_{\text{опт}} = f(v_{\text{опт}})$ при испытаниях на машине трения РП.

2. Значения в знаменателе используются для определения зависимости $p_{\text{пред}} = f(v_{\text{пред}})$ при проведении испытаний на машине трения СМТ-1.

Оптимальные эксплуатационные режимы трения пары с ТСП ВНИИ НП 212 определялись следующим образом. Вначале находили оптимальные эксплуатационные режимы трения путем подстановки в уравнение (2) значения температуры, соответствующей по данным работы [1] максимальной долговечности рассматриваемого ТСП, $T = 100^\circ\text{C}$, что также соответствует зоне перехода абразивного механизма трения к термоусталостному виду разрушения. После соответствующих преобразований было получено уравнение

$$47,94v^2 - 0,234pv + 2,094 \cdot 10^{-3}p^2 - 132,23v - 0,535p + 63,51 = 0. \quad (3)$$

Графически данная зависимость соответствовала эллипсу, приведенному на рис. 2 (кривая 3). Затем определялись координаты предельных точек эллипса (уравнение (3)), расположенных на границе исследуемого диапазона варьирования факторов p и v — точки A и B , которые были использованы для построения гиперболической зависимости. Далее исходя из координат центра эллипсов (точка O) были найдены уравнения прямых, соответствующих отрезкам AO и BO . После преобразования уравнение оптимальных по долговечности режимов трения пар с ТСП приняло вид

$$p_{\text{опт}} = 6,636v_{\text{опт}}^{-1,759}. \quad (4)$$

Полученная зависимость позволяет определить оптимальные для исследуемого типа ТСП эксплуатационные режимы по долговечности работы фрикционных сопряжений (для диапазонов варьирования $p = 34,7 \dots 106,9$ МПа, $v = 0,206 \dots 0,390$ м/с).

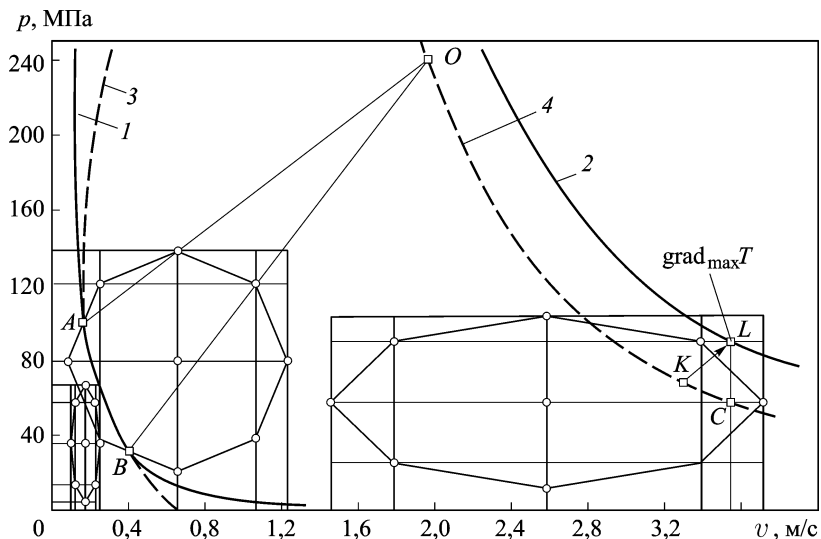


Рис. 2. Зависимости типа $p_{\text{жонт}} = f(v)$ для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212: 1 — на оптимальном режиме трения $p_{\text{опт}} = 6,636v_{\text{опт}}^{-1,759}$; 2 — на предельных режимах трения $p_{\text{пред}} = 1397,8v_{\text{пред}}^{-2,132}$; 3, 4 — исходные кривые, полученные экспериментально

Для нахождения предельных режимов трения был разработан алгоритм (рис. 3). В соответствии с ним на первом этапе оцениваются предельные режимы трения рассматриваемого ТСП ВНИИ НП 212. Для этого на машине трения СМТ-1 проводились следующие эксперименты. В первом опыте после приработки при $N = 1000$ Н скорость скольжения увеличивалась до $v_{\text{max}} = 3,88$ м/с. Затем увеличивалась нагрузка до $N = 1826$ Н ($p = 97$ МПа), после чего температура трения возросла до 282 °С, и пары трения вышли из строя. Во втором эксперименте предельные режимы трения составили $N_{\text{max}} = 1826$ Н ($p = 95,7$ МПа), $v_{\text{max}} = 2,85$ м/с, $T_{\text{разр}} = 260$ °С. В третьем опыте при $N_{\text{max}} = 1826$ Н ($p = 90,6$ МПа) и $v_{\text{max}} = 3,88$ м/с $T_{\text{разр}} = 284$ °С.

Таким образом, средняя температура разрушения составила $T_{\text{разр}} = 275$ °С (при среднем $p = 94,4$ МПа, $v = 3,54$ м/с — точка L, см. рис. 2).

Это значение согласуется с данными работ [3, 4], где температура разрушения ТСП рассматриваемого типа определяется диапазоном $250 \dots 300$ °С.

На следующем этапе согласно разработанному алгоритму (см. рис. 3) в целях исследования комплексной зависимости $T_{\text{тр}} = f(p, v)$ для ТСП ВНИИ НП 212 на режимах, близких к предельным, был проведен планируемый эксперимент по типу ЦКРУП второго порядка на модернизированной машине трения СМТ-1. Уровни варьирования факторов представлены в табл. 1 (в знаменателе). В результате обработки данных планируемого эксперимента получена следующая



Рис. 3. Алгоритм нахождения предельных режимов трения

математическая модель, адекватность которой не отвергается при уровне значимости $\alpha = 0,05$:

$$T_{\text{тр}} = 119,35 + 10,26v + 0,037N + 0,19vN. \quad (5)$$

С учетом измеренной после опыта на контрообразце площади пятна контакта уравнение (5), записанное в универсальной форме, приняло вид

$$T_{\text{тр}} = 119,35 + 10,26v + 0,065p + 0,335vp. \quad (6)$$

Корректность полученных зависимостей была проверена на стенде шайба–диск [5] для ТСП типа Molykote7409 (обработка основы — перекрестное шлифование, материал образцов — закаленная сталь 60 — $HV_{30\text{BO}}/HV_{30\text{HO}} = 770/780$). Был осуществлен планируемый эксперимент второго порядка типа ЦКРУП.

В результате проведения эксперимента и обработки полученных данных была рассчитана следующая математическая модель второго порядка:

$$T_{\text{тр}} = 67,27 - 98,96v + 0,464p + 6,42pv - 0,011p^2. \quad (7)$$

Таким образом, получены три математические модели зависимости $T_{\text{тр}} = f(p, v)$ для различных схем трения и диапазонов варьирования факторов (табл. 2).

Зависимости $T_{тр} = f(p, v)$ для различных схем трения и диапазонов варьирования факторов

Тип ТСП на основе MoS ₂	Схема трения	Диапазоны изменения		Зависимости $T_{тр} = f(p, v)$
		$N, Н$	$v, м/с$	
ВНИИ НП 212	Роликовая (машина трения РП)	236...1337	0,096...1,224	$T_{тр} = 36,49 + 132,23v + 0,535p + 0,234pv - 47,94v^2 - 2,094 \cdot 10^{-3}p^2$
ВНИИ НП 212	Роликовая (машина трения СМТ)	210...1790	1,472...3,728	$T_{тр} = 119,35 + 10,26v + 0,065p + 0,335pv$
Molykote 7409	Торцевая (стенд шайба-диск)	755...9045	0,11...0,25	$T_{тр} = 67,27 - 98,96v + 0,464p + 6,42pv - 0,011p^2$

Графическая интерпретация зависимостей типа $T_{тр} = f(p, v)$, представленная на рис. 4 для различных схем трения, показывает удовлетворительную сходимость значений $T_{тр}$ для различных схем, что подтверждает корректность полученных результатов.

Далее в соответствии с предложенным алгоритмом (см. рис. 3) построение изотермы для наибольших значений достигнутых в экспериментах температур ($p_{max} = f(v_{max})$) проводилось в следующей последовательности.

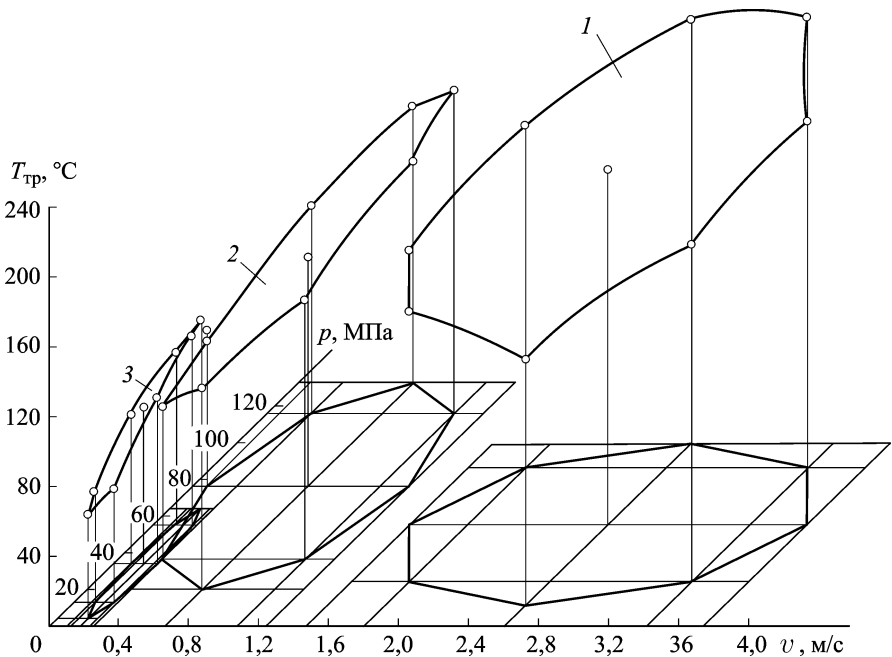


Рис. 4. Зависимости $T_{тр} = f(p, v)$, полученные на машинах трения СМТ-I и РП ТСП ВНИИ НП 212 (1, 2) и на стенде шайба-диск ТСП Molykote7409 (3)

Уравнение (7) описывает поверхность типа эллиптического параболоида, имеющего максимум в точке O (см. рис. 2), где $T_{\text{тр}} = 230^\circ\text{C}$. Через эту точку необходимо провести изотерму, соответствующую $T_{\text{тр}} = 230^\circ\text{C}$. Вторая точка находилась из уравнения (6) для значения v , соответствующего абсциссе средней предельной температуры разрушения ($\bar{v} = 3,54$ м/с). Из зависимости (6) для $v = 3,54$ м/с контактное давление составило $p = 59,42$ МПа (точка C , см. рис. 2). Используя точки O и C для $T_{\text{max}} = 230^\circ\text{C}$, получили искомое уравнение

$$p_{\text{max}} = 1130,8v_{\text{max}}^{-2,33}. \quad (8)$$

Затем на основе анализа уравнения (8) определялось направление максимального градиента изменения $T_{\text{тр}}$ ($\sim 45^\circ$), в направлении которого смещалась кривая 4 (см. рис. 2), соответствующая $T_{\text{тр}} = 230^\circ\text{C}$, до найденной ранее средней предельной температуры разрушения $T_{\text{разр}} = 275^\circ\text{C}$ (точка L). В результате расчетов при использовании координат $p_{\text{пред}}$ и $v_{\text{пред}}$ (точка L) получено искомое уравнение $p_{\text{пред}} = f(v_{\text{пред}})$:

$$p_{\text{пред}} = 1397,8v_{\text{пред}}^{-2,132}. \quad (9)$$

Предлагаемый способ позволяет экспериментально определить предельные эксплуатационные режимы трения смазочных материалов для любого сочетания контактного давления и скорости скольжения пары трения с применением исследуемого смазочного материала, т.е., имея рассчитанное исходя из конструктивных соображений значение контактного давления, можно определить предельную и оптимальную скорости скольжения пары с использованием данного смазочного материала и, наоборот, зная заданную скорость скольжения пары трения, можно рассчитать предельное контактное давление и выбрать оптимальные режимы нагрузки или конструкцию узла трения.

Способ отличается универсальностью, простотой и высокой производительностью, так как все необходимые для расчета уравнения регрессии данные можно получить всего лишь за одно испытание, многократно повторив каждый режим трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С е н т ю р и х и н а Л. Н., О п а р и н а Е. М. Твердые дисульфид-молибденовые смазки. – М.: Химия, 1966. – 152 с.
2. Х о п и н П. Н., П о п о в О. В., К о м а р о в В. А. Экспериментальная оценка работоспособности пар трения с твердосмазочным покрытием в зависимости от температурного фактора // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, № 6. – С. 1109–1116.
3. Х о п и н П. Н. Способ определения предельных и оптимальных режимов трения твердосмазочных покрытий // Сб. науч. трудов межвуз. науч.-техн. прог. “Ресурсосберегающие технологии машиностроения”. – М.: МГААТМ, 1995. – С. 300–303.

4. С е н т ю р и х и н а Л. Н., О п а р и н а Е. М., Р у б ц о в а З. С. Ассортимент твердых смазочных покрытий на основе дисульфида молибдена и область их применения // В кн.: Пластичные смазки и твердые смазочные покрытия. Труды ВНИИ НП, вып. XI. – М.: Химия, 1969. – С. 252–262.
5. Х о п и н П. Н. К вопросу о расчете долговечности пар трения с твердосмазочными покрытиями различных составов // В сб. “Научн. труды МАТИ”, вып. 7(79). – М.: “МАТИ” – РГТУ им. К.Э. Циолковского, 2004. – С. 187–191.

Статья поступила в редакцию 26.02.2010

Пётр Николаевич Хопин родился в 1955 г., окончил МАТИ им. К.Э. Циолковского в 1977 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Технология производства двигателей летательных аппаратов” ГОУ ВПО “МАТИ” им. К.Э. Циолковского. Автор 42 научных работ в области триботехники.

P.N. Khopin (b. 1955) graduated from the Moscow Aviation-Technological Institute n.a. K.E. Tsiolkovskii in 1977. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of the “Technology of Production of Engines of Flying Vehicles” of State Educational Institution for Higher Professional Education “МАТИ” n.a. K.E. Tsiolkovskii. Author of 42 publications in the field of tribotechnology.

