

Пути повышения износостойкости трущихся пар высокоскоростных установок и узлов трения

Канд. техн. наук В. А. БАЛАКИН

При высоких скоростях скольжения удельная интенсивность тепловыделения в зоне фрикционного контакта может превышать 100 МВт/м². Образующиеся на границе контакта тепловые потоки обуславливают возникновение интенсивных процессов нагрева, оплавления и износа взаимодействующих поверхностей трущихся пар. Наиболее неблагоприятный для износа режим высокоскоростного трения — трение без смазки.

В данной статье анализируются основные направления в разработке путей повышения износостойкости конструкционных материалов при высоких скоростях скольжения, а также пути повышения рабочих параметров высокоскоростных устройств.

Износ трущихся пар можно снизить, вводя в зону их контакта тонкий слой третьего тела, обладающего определенным комплексом теплофизических свойств. В условиях высокоскоростного трения смазка не всегда эффективна. Слой третьего тела должен разъединять трущиеся тела, предохраняя их от непосредственного контакта; воспринимать нормальную нагрузку, являясь объектом передоформирования и источником тепловыделения; обладать малым удельным сопротивлением сдвигу; максимально поглощать теплоту трения, ограничивая нагрев трущихся поверхностей лишь допустимыми температурами; обладать малой твердостью и температурой плавления по сравнению с аналогичными свойствами трущихся тел.

В зоне высокоскоростного фрикционного контакта третье тело может размягчаться, плавиться, разлагаться, испаряться, подвергаться сублимации, диссоциации. Эти процессы сопровождаются определенными тепловыми эффектами, используя которые, можно поглощать значительные количества теплоты трения. Вводить третье тело в зону трения можно посредством предварительного нанесения его на одно из тел (например, контртело) либо путем вдувания его в область контакта. В последнем случае поглотитель теплоты должен находиться в весьма пластическом или жидком состоянии.

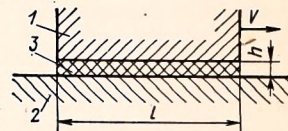
Рассмотрим возможности поглощения теплоты трения различных по природе веществ, находящихся в зоне фрикционного контакта длиной l , шириной b в виде пленки толщиной h (рисунок). Наибольшее количество теплоты пленка может поглотить, если в результате нагрева за время контакта, равное l/v (v — скорость скольжения), она перейдет из твердого состояния в парообразное (газообразное).

Для пленки из таких веществ, как, например, лед, олово, свинец, цинк, алюминий, медь, натрий, литий, хлористый натрий эта теплота определяется из выражения

$$Q = c_1 m (T_{\text{пл}} - \vartheta_0) + r m + c_2 m (T_{\text{к}} - T_{\text{пл}}) + k_1 m, \quad (1)$$

где $c_1 = \frac{\int_{\vartheta_0}^{T_{\text{пл}}} c(\vartheta) d\vartheta}{T_{\text{пл}} - \vartheta_0}$ — средняя удельная теплоемкость пленки в твердом состоянии [$c(\vartheta)$ — удельная теплоемкость пленки при температуре ϑ]; c_2 — средняя удельная теплоемкость пленки в жидком состоянии; $m = bhlp$ — масса пленки в зоне фрикционного контакта; ρ — плотность пленки; ϑ_0 , $T_{\text{пл}}$, $T_{\text{к}}$ — температуры начальной, плавления и кипения; r — удельная теплота плавления; k_1 — удельная теплота испарения.

Скольжение тела 1 по контртелу 2 при наличии в зоне контакта поглотителя теплоты в виде пленки 3



Однако максимальная температура нагрева пленки может быть ограничена допустимой температурой $\vartheta_{\text{д}}$ нагрева поверхностей трения тел 1 и 2 (см. рисунок); начальная температура ϑ_0 тоже, как правило, известна. В результате этого при анализе эффективности использования в качестве поглотителя теплоты того или иного вещества из перечисленных выше необходимо в правой части формулы (1) учитывать лишь соответствующие конкретным условиям нагрева слагаемые.

Существует ряд диссоциирующих веществ, у которых перегрев пара сопровождается химическими реакциями (распадом молекул газа на несколько более простых частей) с поглощением значительного количества теплоты. Диссоциация происходит в определенном температурном диапазоне. Количество теплоты, поглощаемой при этом, $\Delta Q = k_2 m$ (k_2 — удельная теплота химической реакции). Полное количество теплоты, поглощаемое веществом в процессе перехода из твердого состояния в газообразное при нагреве диссоциирующих веществ, определяется суммой $Q_{\text{х}} = Q + \Delta Q$.

Перспективными диссоциирующими веществами, применяющимися, в частности, в качестве теплоносителей ядерных реакторов атомных электростанций, являются N_2O_4 , Al_2Cl_6 , Al_2Br_6 [1].

В температурном интервале от 262 до 294 К N_2O_4 — жидкость; для Al_2Cl_6 $T_R = 466$ К; для Al_2Br_6 $T_{пл} = 370$ К, $T_R = 529$ К.

Такие материалы, как полимеры с линейной структурой (термопласты) при нагревании свыше $T_{пл}$ не переходят из высокоэластичного состояния в вязкотекучее. При превышении некоторой температуры T_p они начинают разлагаться. Полная теплота разложения определяется выражением

$$Q_p = c_1 m (T_p - \vartheta_0) + k_3 m,$$

где k_3 — удельная теплота термического разложения.

Наиболее изученным из термопластов является фторопласт [2]. Разложение (деполимеризация), например, фторопласта-4 происходит при температурах, превышающих $T_p = 690$ К; полная теплота разложения материала $Q_p \approx 2,2$ МДж/кг.

В таблице приведены теплофизические свойства различных веществ [1—4], а также количества теплоты, которые может поглотить единица массы (Q' , Q_x , Q_p) и единица объема (Q'' , Q_x'' , Q_p'') вещества при нагреве его, например, от $\vartheta_0 = 273$ К до $\vartheta_d = 1673$ К. Значения Q'' , Q_x'' , Q_p'' характеризуют способность пленки одинаковой толщины (объема), но из разных веществ, с учетом их плотности в заданном температурном диапазоне нагрева поглощать теплоту трения.

Если $\vartheta_d = 1673$ К (температура кипения лития), то лучшими поглотителями теплоты (см. таблицу) являются цинк, литий, медь, натрий. Аналогичный анализ показывает, что, если $\vartheta_d = 1356$ К (температура плавления меди), к лучшим поглотителям теплоты относятся цинк, медь, фторопласт-4, если $\vartheta_d = 933$ К (температура плавления алюминия), — фторопласт-4, N_2O_4 , цинк, вода; если $\vartheta_d = 680$ К, — вода, N_2O_4 . В таблице приведены средние величины вязкости μ в температурных интервалах от $T_{пл}$ до T_R либо от $T_{пл}$ до ϑ_d (если $\vartheta_d < T_R$).

Для анализа процесса теплообразования в зоне высокоскоростного фрикционного контакта силу трения T представим в виде $T = \tau_{ср} A_a$, где $\tau_{ср}$ —

средняя удельная сила трения; A_a — номинальная площадь касания.

На поверхности контакта имеются участки, где пленка может находиться в различных агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Ее сопротивление сдвигу может колебаться в пределах от τ_T — сопротивления сдвигу еще не нагретой пленки в твердом состоянии до τ_T — сопротивления сдвигу нагретого до температуры ϑ слоя газа.

Средняя удельная сила трения

$$\tau_{ср} = \frac{\int_0^{A_a} \tau(A) dA}{A_a},$$

где $\tau(A)$ — значение удельной силы трения на данном участке номинальной площади касания.

Если процесс трения кратковременный и передача теплоты в тела 1, 2 происходит в условиях нестационарной теплопроводности, либо если скорость скольжения является переменной, то величина $\tau_{ср}$ зависит от времени. Текущее значение $\tau_{ср}(t)$ в пределах малого интервала времени $\Delta t = t_2 - t_1$ определяется выражением

$$\tau_{ср}(t) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \int_0^{A_a} \tau(A, t) dA dt}{A_a (t_2 - t_1)}.$$

Поскольку на значительной части номинальной площади касания пленка может находиться в псевдожидком, жидком и газообразном состояниях, среднюю удельную силу трения представим как среднее напряжение вязкому сдвигу, т. е. приведем к виду

$$\tau_{ср}(t) = \mu_{ср}(t) \frac{dv}{dh} \approx \mu_{ср}(t) \frac{v}{h},$$

где $\mu_{ср}(t)$ — среднее значение коэффициента динамической вязкости; v — скорость скольжения; h — средняя толщина пленки в контакте.

Величина $\mu_{ср}(t)$ зависит от природы вещества пленки, ее объемной температуры, соотношений между площадями и объемами, занимаемыми твердым, жидким и газообразным состояниями пленки в пределах номинальной площади касания.

Средняя интенсивность удельного тепловыделения в зоне фрикционного контакта

$$q_a(t) = \tau_{ср}(t) v \approx \mu_{ср}(t) \frac{v^2}{h}. \quad (2)$$

Поскольку толщина слоя пленки мала, можно определить среднюю удельную интенсивность теплопоглощения в этом слое за время $t = l/v$, воспользовавшись выражениями

Вещество	c_1 , кДж/кгК	c_2 , кДж/кгК	$T_{пл}$, К	ρ , кг/м ³	$\mu \cdot 10^{-6}$, Па·с	Q' , Q_x , Q_p , МДж/кг	Q'' , Q_x'' , Q_p'' , МДж/м ³			
Лед (вода)	2,12	4,18	273	330	373	2,26	1 000	6,5	2,68	2 680
Олово	0,22	0,24	505	59	2543	2,39	7 500	10,7	0,39	2 920
Свинец	0,13	0,14	600	23	2010	0,86	11 000	12,1	0,21	2 310
Цинк	0,40	0,49	693	105	1179	1,75	7 900	19,2	2,25	17 700
Алюминий	0,9	1,09	933	402	2273	12,8	2 700	14,3	1,8	4 860
Медь	0,43	0,43	1356	214	2573	—	8 930	—	0,82	7 330
Натрий	1,22	1,27	371	113	1151	4,18	928	1,9	5,40	5 010
NaCl	0,98	1,09	1075	519	1713	2,84	2 164	—	1,96	4 240
Литий	3,31	4,18	452	666	1673	19,6	534	4,6	26,1	14 900
N_2O_4	—	1,48	262	159	294	0,42	1 510	5,0	2,31	3 500
Фторопласт-4	0,8	1,44	600	—	690	1,74	1 800	—	2,2	3 960

$$\left. \begin{aligned} q_{a_1}^* &= \frac{Q'm}{A_a t} = \frac{\rho h Q'v}{l}; \\ q_{a_2}^* &= \frac{Q_x'm}{A_a t} = \frac{\rho h Q'_x v}{l}; \\ q_{a_3}^* &= \frac{Q_p'm}{A_a t} = \frac{\rho h Q'_p v}{l}. \end{aligned} \right\} (3)$$

Анализ формул (2), (3) показывает, что чем больше толщина пленки, тем меньше средняя интенсивность удельного тепловыделения в зоне высокоскоростного фрикционного контакта.

В каждом конкретном случае толщина пленки должна быть оптимальной. Например, если твердая или жидкая пленка предварительно нанесена на контртело, ее толщина должна быть такой, чтобы вся пленка попадала в зону контакта реальных (шероховатых) тел. При наличии излишне толстой пленки происходит срез, вовлечение в движение и отбрасывание в сторону части ее массы. Это существенно увеличивает сопротивление движению тела по контртелу, в результате чего возникает проблема достижения высоких скоростей на соответствующей установке.

В качестве примера оценим эффективность поглощения теплоты трения пленками цинка, воды и фторопласта-4, нанесенными на контртело. Пусть у тел 1 и 2 (см. рисунок) высота неровностей поверхностей трения $Rz = h = 10$ мкм, $\varphi_d = 1673$ К, $v = 500$ м/с, $l = 0,3$ м. Воспользовавшись выражениями (3), получим для пленки из цинка $q_{a_1}^* = 300$ МВт/м², для воды $q_{a_1}^* = 45$ МВт/м², для

фторопласта-4 $q_{a_3}^* = 65$ МВт/м². Следовательно, предварительное нанесение третьего тела тонким слоем на контртело способствует существенному поглощению пленкой теплоты трения. Метод вдвухвания позволяет непосредственно в зоне фрикционного контакта создавать пленку любой толщины, поэтому он более эффективен.

Процессы плавления и газообразования в области контакта двух тел при высоких скоростях скольжения можно прогнозировать, а следовательно, ими можно управлять. При этом целесообразно использовать смеси, например, N₂O₄ + фторопласт, вода + фторопласт, цинк + медь и т. п. Применение в смеси веществ с низкой точкой кипения способствует парообразованию, снижению $\mu_{ср}(t)$ и $q_a(t)$, уменьшению интенсивности изнашивания трущихся пар.

Метод вдвухвания наиболее эффективен для установок, оборудованных направляющими большой длины. Предварительное нанесение третьего тела в виде пленки может быть также использовано в различных узлах трения [5].

Список литературы

1. Нестеренко В. Б. Физико-технические основы применения диссоциирующих газов как теплоносителей и рабочих тел атомных электростанций. Минск: Наука и техника, 1971. 312 с.
2. Горяинова А. В., Божков Г. К., Тихонова М. С. Фторопласты в машиностроении. М.: Машиностроение, 1971. 232 с.
3. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам веществ. М. — Л.: Госэнергоиздат, 1956. 367 с.
4. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Физматгиз, 1963. 708 с.
5. Балакин В. А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения. М.: Машиностроение, 1980. 135 с.