

# Выбор материалов трущихся пар к высокоскоростным установкам и узлам трения

Канд. техн. наук В. А. БАЛАКИН

Характерной особенностью работы применяемых в различных отраслях промышленности высокоскоростных установок и узлов трения является интенсивное тепловыделение в зоне фрикционного контакта, достигающее десятков и даже сотен МВт/м<sup>2</sup>. При этом контактная температура может быть близкой или даже равной температуре плавления одного из трущихся тел. Результаты исследований процессов высокоскоростного трения при скоростях до 800 м/с, полученные в условиях испытаний на ультрацентрифугах Бимса [1] и направляющих большой длины [2, 3], показали, что можно построить в порядке возрастания износостойкости следующий ряд материалов: висмут, алюминий, медь, чугун, сталь У10, сталь Г13, сталь 45, сталь Ст3, сталь 30ХГС, сталь 10, армо-железо, сплав ВМ-2, молибден, вольфрам (рисунок). Сплошные линии на рисунке характеризуют количественные значения интенсивностей изнашивания материалов в условиях трения по направляющей большой длины при скорости 350 м/с; штриховые линии дают качественное представление об относительной износостойкости материалов; они нанесены на основе обобщения результатов испытаний, полученных на различных высокоскоростных установках и режимах трения.

С целью объяснения такой последовательности расположения материалов в этом ряду рассмотрим на основе анализа теплофизических процессов в области контакта комплексы безразмерных критериев для оценки относительной износостойкости материалов при высокоскоростном трении. Представим зависимость износостойкости от сопротивляемости материалов оплавлению в конкретном узле трения с заданным режимом работы (удельной нагрузкой на единицу номинальной площади касания  $p_a$ , скоростью скольжения  $v$ ) и постоянным тепловыделением  $[p_a v]$  (где  $[\ ]$  — коэффициент трения). Контактное тело прием абсолютно жестким.

Время начала оплавления исследуемого материала

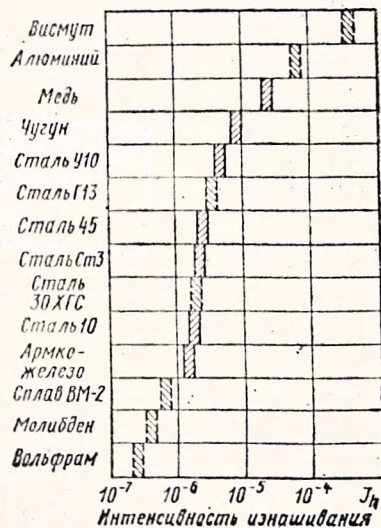
под действием постоянного по величине теплового потока интенсивностью  $q_1$  определяют из выражения [2]

$$t_{\text{пл}} = \frac{\pi}{4} \frac{\lambda_1^2 (T_{\text{пл1}} - \vartheta_0)^2}{a_1 q_1^2}, \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности;  $a_1$  — температуропроводность;  $T_{\text{пл1}}$  — температура плавления;  $\vartheta_0$  — начальная температура.

Как видим, сопротивляемость материала оплавлению под действием теплового потока  $q_1$  определяется

параметром  $\frac{\lambda_1^2 (T_{\text{пл1}} - \vartheta_0)^2}{a_1}$ , имеющим размер-



Библиотекс им А.И. Герцена  
Фрагмент 19.X.2021.

ность  $\text{Вт}^2/\text{м}^4$ . В качестве критерия, позволяющего сравнивать материалы по этому параметру, примем безразмерное отношение

$$K_1 = \frac{\lambda_1^2 (T_{\text{пл1}} - \vartheta_0)^2}{a_1 \left[ \frac{\lambda_1^2 (T_{\text{пл1}} - \vartheta_0)^2}{a_1} \right]^*},$$

в знаменателе которого помещены теплофизические характеристики материала, принимаемого за эталон сравнения. За эталон автором принят висмут, хотя можно было принять любой материал.

При одном и том же тепловыделении в области фрикционного контакта тепловой поток определяют по формуле

$$q_1 = \alpha_{\text{т.п}} p_a v,$$

где  $\alpha_{\text{т.п}}$  — коэффициент распределения тепла.

При высокоскоростном трении для установок с малым коэффициентом взаимного перекрытия значение  $\alpha_{\text{т.п}}$  определяется по формуле Егера [4]:

$$\alpha_{\text{т.п}} = \frac{1,25\lambda_1 a_2^{1/2}}{1,25\lambda_1 a_2^{1/2} + \lambda_2 \left(\frac{lv}{2}\right)^{1/2}} = \frac{1}{1 + 0,57 \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \text{Re}_2^{1/2}},$$

где  $l$  — длина скользящего элемента;  $\lambda_2$  и  $a_2$  — теплопроводность и температуропроводность контртела;  $\text{Re}_2$  — число Пекле.

Таким образом,  $\alpha_{\text{т.п}}$  характеризует способность материала поглощать тепло, а отношение  $\frac{1}{\alpha_{\text{т.п}}}$  — способность материала сопротивляться проникновению тепла в узле трения с фиксированными значениями  $p_a$  и  $v$ . Критерием, позволяющим сравнивать материалы по этому параметру, будет отношение

$$K_2 = \frac{\alpha_{\text{т.п}}^*}{\alpha_{\text{т.п}}},$$

где  $\alpha_{\text{т.п}}^*$  — коэффициент распределения тепла для материала, принятого за эталон сравнения.

Если время работы высокоскоростного узла трения  $t \leq t_{\text{пл}}$ , то согласно выражению (1) критерием для оценки относительной износостойкости материалов является произведение

$$K = K_1 K_2^2;$$

если же  $t \gg t_{\text{пл}}$ , то критерий для оценки относительной износостойкости материалов определяется отношением

$$K_3 = \frac{s^*}{s},$$

где  $s^*$  и  $s$  — скорости оплавления материала, принятого за эталон, и исследуемого материала.

Материал	$\frac{\lambda_1^2 (T_{\text{пл1}} - \vartheta_0)^2}{a_1}$	$\alpha_{\text{т.п}} \cdot 10^4$	$\rho_1 \cdot 10^{-3}$	$r_1 \cdot 10^{-3}$	$\frac{c_1}{\text{кг}^\circ\text{C}}$	$\rho_1 [r_1 + c_1 (T_{\text{пл1}} - \vartheta_0)] \cdot 10^{-2}$
	$\frac{\text{МВт}^2\text{с}}{\text{м}^4}$					
Висмут	0,72	1	9,94	54,4	121	8,9
Свинец	5,1	4,1	11	23	133	7,3
Олово	5,75	7,6	7,5	58,5	230	8,4
Цинк	53,5	13	7,9	105	402	21,6
Чугун	175	3,64	7,2	138	586	60,5
Алюминий	264	28,2	2,8	385	955	28,8
Сталь У10	390	4,7	7,67	84	660	80,1
Сталь 45	422	4,8	7,67	84	660	81,4
Сталь 10	515	5,3	7,68	84	680	85
Армко-железо	555	5,5	7,7	100	680	87,5
Карбид титана	652	3	4,9	80	561	90
Карбид вольфрама	673	3,7	15,6	80	184	93,7
Карбид тантала	890	2,8	14,5	80	188	116
Тантал	1200	7,1	16,6	200	141	103
Медь	1570	44,5	9	213	406	58,8
Молибден	2980	12,7	10,75	201	280	100
Вольфрам	4450	13,2	20	255	142	147

Скорость оплавления материала под действием теплового потока постоянной интенсивности  $q_1$  можно определить согласно работе [5] выражением

$$\dot{s} = \frac{q_1}{\rho_1 [r_1 + c_1 (T_{\text{пл1}} - \vartheta_0)]},$$

где  $\rho_1$  — плотность;  $r_1$  — удельная теплота плавления;  $c_1$  — удельная теплоемкость. Тогда можно написать

$$K_3 = \frac{\rho_1 [r_1 + c_1 (T_{\text{пл1}} - \vartheta_0)]}{\rho_1^* [r_1 + c_1 (T_{\text{пл1}} - \vartheta_0)]^*},$$

где в знаменателе указаны теплофизические характеристики материала, принимаемого за эталон.

В общем случае, когда  $t \geq t_{\text{пл}}$ , комплекс критериев находят из выражения

$$K = \frac{K_1 K_2^2 + \frac{t - t_{\text{пл}}}{t_{\text{пл}}} K_3}{\frac{t}{t_{\text{пл}}}}.$$

Если критерии  $K_1$  и  $K_3$  зависят лишь от теплофизических свойств исследуемого материала и их числовые значения являются постоянными (при заданном материале эталона), то значения критерия  $K_2$  зависят как от теплофизических свойств трущихся пар, так и от конструктивных особенностей узла трения.

В табл. 1 приведены исходные данные для определения критериев  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  и  $K$ . Перечень материалов, представленных в ней, включает широко используемые в промышленности металлы, компоненты сплавов и сплавы, теплофизические характеристики которых известны; большинство материалов испытано при высоких скоростях скольжения (см. рисунок) Рис. 2. Расчет  $\alpha_{\text{т.п}}$  выполняли для случая скольжения колодки длиной  $l=0,3$  м по направляющей большой длины со скоростью  $v=350$  м/с. Материал контртела — сталь 65 ( $\lambda_2=37,6$  Вт/м $^\circ\text{C}$ ,  $a_2=7,5 \cdot 10^{-6}$  м $^2$ /с). В табл. 2 приведены числовые значения критериев  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_1 K_2^2$  и  $K_3$ , а в табл. 3 — числовые значения критерия  $K$  для отношения  $t/t_{\text{пл}}$  от 1 до 10.

Из данных табл. 2 видно, что наименьшие значения  $K_1$  у таких легкоплавких металлов, как висмут, свинец и олово, наибольшие — у тугоплавких металлов: тантала, молибдена, вольфрама, а также меди. Зна-

Таблица 2

Материал	$K_1$	$K_2$	$K_1 K_2^2$	$K_3$
Висмут	1	1	1	1
Свинец	7,1	0,244	0,42	0,82
Олово	8	0,132	0,14	0,94
Цинк	74	0,077	0,44	2,43
Чугун	243	0,275	18,3	6,8
Алюминий	367	0,035	0,48	3,23
Сталь У10	541	0,213	24,5	9
Сталь 45	586	0,208	25,5	9,14
Сталь 10	715	0,189	25,6	9,55
Армко-железо	770	0,182	25,6	9,83
Карбид титана	905	0,333	110	10,1
Карбид вольфрама	935	0,271	68,3	10,5
Карбид тантала	1240	0,357	157	13
Тантал	1670	0,141	33,1	11,6
Медь	2180	0,0225	1,11	6,63
Молибден	4130	0,079	26,2	11,3
Вольфрам	6180	0,076	36	16,5

Таблица 3

Материал	$K$				
	$\frac{t}{t_{пл}}=1$	$\frac{t}{t_{пл}}=2$	$\frac{t}{t_{пл}}=3$	$\frac{t}{t_{пл}}=5$	$\frac{t}{t_{пл}}=10$
Олово	0,14	0,54	0,67	0,76	0,86
Свинец	0,42	0,62	0,69	0,72	0,78
Цинк	0,44	1,43	1,77	2,04	2,23
Алюминий	0,48	1,85	2,31	2,68	2,86
Висмут	1	1	1	1	1
Медь	1,11	3,87	4,79	5,52	6,08
Чугун	18,3	12,5	10,6	9,1	7,95
Сталь У10	24,5	16,7	14,2	12,1	10,5
Сталь 45	25,5	17,3	14,6	12,4	10,8
Сталь 10	25,6	17,5	14,9	12,7	11,2
Армко-железо	25,6	17,7	15,1	13	11,4
Молибден	26,2	18,8	16,3	14,3	12,8
Тантал	33,1	22,3	18,6	15,9	13,7
Вольфрам	36,6	26,3	23	20,4	18,4
Карбид вольфрама	68,3	39,4	29,8	22,1	16,3
Карбид титана	100	55	40	28,1	19,1
Карбид тантала	157	84	60,3	39,8	27,4

чения  $K_2$  показывают, что при одном и том же тепловыделении в зоне фрикционного контакта наибольшей сопротивляемостью проникновению в них тепла обладают такие материалы, как висмут, карбиды тантала, титана, вольфрама (из-за малости коэффициентов теплопроводности); наименьшая сопротивляемость проникновению тепла у меди и алюминия. Наибольшие значения  $K_3$  имеют тугоплавкие металлы, а также их карбиды.

Если  $t \leq t_{пл}$ , теоретический ряд относительной износостойкости материалов представлен первой графой табл. 3; при  $t > t_{пл}$  критерий  $K$  вычисляется для соответствующих отношений  $t/t_{пл}$ . Приведенные в табл. 3 значения  $K$  помогают объяснить представленные на рисунке результаты экспериментов.

При выборе материалов трущихся пар к высокоскоростным установкам и узлам трения необходимо иметь в виду, что материал одного из трущихся тел (контртела) может быть заранее заданым по физическим характеристикам, а также исходя из соображений прочности и технологии изготовления. В таких случаях задача сводится к подбору материала второго тела.

Высокоскоростные узлы трения могут работать в антифрикционном либо фрикционном режимах. В связи с этим при выборе материалов для каждой высокоскоростной пары трения должен быть индивидуальным. Для упрощения критерия  $K$  существенно упрощает задачу выбора того или иного материала применительно к конкретным условиям трения. Рекомендуется такая последовательность решения задачи: оценить интенсивность тепловыделения  $[p_a]$ ; определить значение  $q_1$ ; вычислить  $t_{пл}$ ; найти критерии  $K_1$ ,  $K_2$  и  $K_3$  (если за эталон принят висмут, то значения  $K_1$  и  $K_3$  можно брать из табл. 2); определить критерий  $K$  и, наконец, провести необходимый анализ (например, если материал контртела задан и к нему предъявляются повышенные требования по износостойкости, материал второго тела должен иметь значения  $K$  меньше, чем у контртела, и т. п.).

### Список литературы

1. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. М., Машиностроение, 1968, с. 433—458.
2. Балакин В. А., Балакина Н. А. Оплавление твердого тела при высокоскоростном трении. Межвузовский темат. сб. «Среда и трение в механизмах», Таганрог, ТРТИ им. Калмыкова, 1976, вып. II, с. 16—26.
3. Горюнов В. М. Исследования трения при нестационарном высокоскоростном режиме. — В сб.: Новое в теории трения. М., Наука, 1966, с. 91—97.
4. Балакин В. А. Основы прочности поверхностного слоя. Гомель, ГГУ, 1974, 242 с.
5. Балакин В. А. Анализ тепловыделения и толщины расплавленного слоя в области контакта твердых тел при высокоскоростном трении. Материалы всесоюз. конф. «Контактно-гидродинамическая теория смазки и ее практическое применение в технике», Куйбышев, КВАН, 1976, с. 20.