

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ИЗНАШИВАНИЯ ПАР ТРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ СКОЛЬЖЕНИЯ

Канд. техн. наук, доц. В. А. БАЛАКИН

Обобщены условия работы высокоскоростных установок и узлов трения, а также описаны три характерных случая процессов изнашивания твердых тел при высоких скоростях скольжения.

Проблемы трения и износа материалов при высоких скоростях скольжения (v до 100 м/с и выше) возникают в ряде отраслей промышленности. В таблице систематизированы условия работы трущихся пар в высокоскоростных установках и узлах трения [1—9]. Характерной особенностью работы большинства высокоскоростных установок и узлов трения является малый коэффициент взаимного перекрытия $K_{вз}$ трущихся тел, малое время процесса трения t_T , большие удельные нагрузки на номинальную площадь касания p_a , высокая интенсивность тепловыделения q (большие числа Пекле Pe). Одно из трущихся тел (скользящий элемент) можно рассматривать в виде выступа, полосы или колодки, находящихся в контакте с контртелом больших размеров. Если трение происходит по свежему следу, по обе стороны фрикционного контакта наблюдается резкая асимметрия температурных полей (так как $Fo_1 \gg Fo_2$, где Fo_1 — число Фурье для скользящего элемента, Fo_2 — число Фурье для контртела). Толщина сильно нагретых поверхностных слоев скользящего элемента может

***) Размерность коэффициентов при P в ординатах рабочей поверхности клиньев — мм/кг.

быть на два-три порядка больше толщины аналогично нагретых поверхностных слоев контртела. Рассмотрим 3 характерных случая.

1. Если механические свойства и температура плавления контртела выше механических свойств и температуры плавления материала скользящего элемента, процесс изнашивания происходит путем переноса (намазывания) тонких поверхностных слоев скользящего элемента на контртело. Такой механизм изнашивания характерен для процессов трения ведущих поясков пуль и снарядов, изготовленных из свинца, меди и т. п., в каналах стальных стволов стрелкового оружия, артиллерийских орудий и легкогазовых пушек [1—3]. Перенос нагретых поверхностных слоев скользящего элемента на контртело наблюдается также при исследованиях высокоскоростного трения на ультрацентрифугах Бимса [4], ракетных треках [5], дисковых установках и инерционных стендах [7], когда прочность и температура плавления материалов образцов меньше аналогичных свойств шарика из стали ШХ-15 либо направляющей, диска и барабана, изготовленных из стали.

В условиях высоких скоростей скольжения температура поверхности трения Φ (табл.) может быть близкой к температуре плавления трущихся тел $T_{пл}$ или достигать ее. В результате в слоях, прилегающих к границе контакта, происходят интенсивные пластические деформации [4, 5], в отдельных точках фактической площади касания возникают локальные очаги оплавления, переходящие с ростом скорости в оплавление больших масштабов, охватывающее значительные площади на границе контакта. Оплавление скользящих элементов наблюдается при выстреле в каналах стволов нарезного оружия и артиллерийских орудий [1, 2], на ультрацентрифугах Бимса [4], на ракетных треках [5], в теплонапряженных тормозах [9], в зубчатых передачах [10], а также в экспериментах по изучению сверхскоростного резания металлов [11].

Таким образом, износ трущейся поверхности скользящего элемента при высокоскоростном трении обусловлен потерей механических свойств, большой адгезией и переносом сильно нагретых и оплавливаемых тонких поверхностных слоев на контртело. Контртело оказывается покрытым тонкой пленкой («адгезионным налетом»). На первый взгляд в таких условиях трения износа контртела происходить не должно. Однако на практике, например в каналах стволов артиллерийских орудий [2], износ все же имеет место. Одна из основных причин износа контртела (в частности, канала ствола) — наличие больших термических напряжений в его поверхностных слоях, вызванных большими температурными градиентами. Термические напряжения ведут к образованию трещин на поверхности трения контртела, их развитию и отделению частиц износа (выкрашиванию поверхности).

2. Если механические свойства и температура плавления скользящего элемента близки к механическим свойствам и температуре плавления контртела, необходимо учитывать особенности контактного взаимодействия трущихся тел. На установках с малым $K_{вз}$ изнашиваемым элементом пары трения также, в основном, является скользящий элемент. Причем, если трение осуществляется по свежему следу, то с ростом скорости скольжения возможно оплавление вершин микронеровностей контртела, а при трении по повторно-повторяющемуся следу контртело за счет переноса материала скользящего элемента, не успевшего еще нагреться до температуры плавления, покрывается тонкой пленкой и в дальнейшем оплавление его поверхностных слоев может не происходить. Границей фрикционного контакта будет трущаяся поверхность скользящего элемента — поверхность пленки. Нагретая либо расплавленная пленка на поверхности контртела окисляется, стано-

Характеристики высокоскоростных установок и узлов трения

Тип установки и узла трения	v , м/с	$K_{вз}$	t_T , с	$\rho_{a'}$, МПа	q , $\frac{МВт}{м^2}$	ϑ , К	F_{01}	F_{02}	Re
Ружье и винтовка [1]	до 800	$10^{-3} \div 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	до 10	до 120	до $T_{пл}$	$10^{-3} \div 10^{-2}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^6$
Артиллерийское орудие [2]	до 800	$10^{-3} \div 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	до 10	до 120	до $T_{пл}$	$10^{-3} \div 10^{-2}$	$\sim 10^{-5}$	$\sim 10^6$
Легкогазовая пушка [3]	до 12000	10^{-3}	$\sim 10^{-4}$	~ 1	до 150	до $T_{пл}$	$\sim 10^{-4}$	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10^7$
Ультратракторифуга Бимса [4]	до 800	$10^{-2} \div 10^{-1}$	0,1—0,3	до 50	до 300	до $T_{пл}$	$10^{-2} \div 10^{-1}$	—	$\sim 10^6$
Ракетные треки [5]	до 1200	$10^{-4} \div 10^{-2}$	до 10	до 20	до 200	до $T_{пл}$	0,1 \div 1,0	$10^{-4} \div 10^{-3}$	$\sim 10^7$
Магниторельсовый тормоз железнодорожного подвижного состава [6]	до 60	$10^{-2} \div 10^{-1}$	до 30	~ 1	до 3	до 1373	0,5—3	$\sim 0,1$	$\sim 10^6$
Высокоскоростные дисковые установки [7]	до 300	$10^{-2} \div 10^{-1}$	—	до 25	до 30	—	—	—	$\sim 10^5$
Газовые подшипники (работа в условиях вибрации) [8]	до 100	$10^{-2} \div 10^{-1}$	$10^{-2} \div 10^{-1}$	—	—	—	—	—	$\sim 10^5$
Тормоз многоместного самолета ГВФ [9]	до 30	0,7 \div 0,8	8—30	$\sim 1,2$	до 6	до 1473	до 3	до 3	—
Тормоз автомобиля [9]	до 30	0,7 \div 0,8	до 10	$\sim 1,2$	до 6	до 773	до 3	до 3	—
Тормоз буровой лебедки [9]	до 10	0,7 \div 0,8	—	до 1,5	до 6	до 873	—	—	—

вится хрупкой и легко удаляется механическим путем. Поверхность трения скользящего элемента также окисляется. Рост пленок происходит, в основном, во время остывания, после завершения процесса высокоскоростного трения. Изнашивание поверхности контртела путем трещинообразования в рассматриваемом случае протекает более интенсивно, так как выше уровень температурных градиентов.

3. Если механические свойства и температура плавления скользящего элемента выше механических свойств и температуры плавления контртела, характер процессов изнашивания будет определяться соотношением этих свойств. При небольшом отличии $T_{пл1}$ от $T_{пл2}$ и $HВ_1$ от $HВ_2$ (где $T_{пл1,2}$, $HВ_{1,2}$ — температура плавления и твердость соответственно скользящего элемента и контртела) процессы изнашивания протекают аналогично рассмотренному выше случаю. Если же $T_{пл1}$ и $T_{пл2}$, а также $HВ_1$ и $HВ_2$ существенно отличаются друг от друга, то при высоких скоростях скольжения интенсивные процессы передоформирования, пластического течения и оплавления локализируются в очень тонких поверхностных слоях контртела, износ которого может быть большим. Это подтверждается экспериментами, выполненными на ракетном треке США [12], когда наблюдался значительный износ направляющей. Скользящие элементы башмаков при этом были изготовлены из тугоплавких металлов.

Предельным случаем оплавления контртела при высокоскоростном трении твердых тел является случай, когда $T_{пл1} \gg T_{пл2}$ и $HВ_1 \gg HВ_2$, например при оплавлении льда на границе контакта полоз конька — лед. Распространение тепла в поверхностном слое льда является нестационарным ($Fo_2 = 10^{-4} \div 10^{-3}$), интенсивность же тепловыделения достаточно высока (q до 1 МВт/м^2 , $Re = 10^4 \div 10^5$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакин В. А., Трение и износ металлов при высоких скоростях скольжения, справочник «Трение, изнашивание и смазка», кн. 1, изд-во «Машиностроение», М., 1978.
2. Montgomery R. S., Muzzle wear of cannon, «Wear», 1975, vol. 33, No 2.
3. Кейбл А., Ускорители для метания со сверхзвуковыми скоростями, «Высокоскоростные ударные явления», изд-во «Мир», М., 1973.
4. Боуден Ф. П., Тейбор Д., Трение и смазка твердых тел, из-во «Машиностроение», М., 1968.
5. Лямин В. И., Хохряков В. А., Динамика ракетных тележек, Оборонгиз, М., 1962.
6. Быков Б. К., Лабораторные испытания фрикционных материалов для башмаков магниторельсовых тормозов, «Тепловая динамика трения», изд-во «Наука», М., 1970.
7. Голего Н. Л., Испытательные машины для исследования процессов трения и износа при больших скоростях скольжения, «Заводская лаборатория», 1963, № 6.
8. Пинегин С. В. и др., Исследование материалов для подшипников с газовой смазкой, изд-во «Наука», М., 1975.
9. Федорченко И. М. др., Исследование материалов для тормозных и передаточных устройств, изд-во «Наукова думка», К., 1976.
10. Дроздов Ю. Н., Трение и противозадирная стойкость тяжело нагруженного фрикционного контакта, «Теория трения, износа и проблемы стандартизации», Приокское книжное издательство, Брянск, 1978.
11. Полосаткин Г. Д., Грибанов С. А., Измерение температуры на поверхности реза при скоростях до 800 м/с, «Известия вузов. Физика», 1965, № 3.
12. Rigali D. J., Feltz L. V., High-speed monorail rocket sleds for aerodynamic testing at high Reynolds numbers, «J. of spacecraft and rockets», 1968, vol. 5, No 11.

Статья поступила 26 июня 1979 г.