

ДИАГНОСТИКА

УДК 621.891:539.621

ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО СКАНИРОВАНИЯ

П.Н. БОГДАНОВИЧ, В.М. БЕЛОВ

(Белорусский государственный университет транспорта, Минск),

Д.В. ТКАЧУК

(Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель)

Представлен принцип действия и конструкция экспериментальной установки, реализующей метод оптико-электронного сканирования и состоящей из высокоскоростной машины трения и системы регистрации температурного поля. Приведены результаты исследований, включающие данные о распределении температур в пределах контактной площадки, единичного пятна контакта и по глубине тонких поверхностных слоев сопрягаемых материалов.

Введение. Фрикционное взаимодействие твердых тел - диссипативный процесс, в котором большая часть работы по преодолению сил трения превращается в тепловую энергию. В высокоскоростных и тяжело нагруженных трибосопряжениях фрикционный нагрев протекает особенно интенсивно и может привести к таким нежелательным последствиям, как изменение структуры и свойств, плавление или деструкция материала поверхностных слоев сопрягаемых элементов. Это в свою очередь нарушает нормальную работу, снижает ресурс и повышает риск выхода из строя механизмов [1]. Поэтому совершенствование аппаратуры и методик тепловой диагностики узлов трения является актуальной проблемой с точки зрения повышения работоспособности машин и оборудования.

Для решения задач регистрации температурных полей в зоне трения наиболее распространены методы прямого измерения температуры (термопары, фотодатчики, термоиндикаторы). Недостаток этих методов состоит в том, что они либо усредняют измеряемую величину по площади контакта, либо вносят значительные погрешности в результат измерения. Куинн и Уинер предложили методику изучения тепловых явлений в контакте тел, одно из которых выполнено из прозрачного материала [2]. Методика позволяет определять размеры, форму и максимальную температуру локальных тепловых источников. Однако точная оценка температуры путем сравнения цветов нагретого эталона и пятен контакта зависит от времени выдержки при фотографировании зоны контакта и качества полученных фотографий. Преимуществом быстродействующих пирометров заключается в возможности регистрации температурных импульсов длительностью порядка микросекунд [3], но они неприменимы для регистрации распределения температуры как в пределах единичного пятна контакта, так и по глубине трущихся тел. Выполненные нами исследования [4] показали, что для тепловой диагностики фрикционных сопряжений целесообразно использовать устройства, принцип действия которых основан на детектировании излучения зоны контакта (в видимом и инфракрасном диапазонах).

Цель работы заключалась в разработке устройства и методики определения температурных полей на поверхностях трения и в поверхностных слоях элементов пар трения.

Метод исследования и его реализация

Геометрия контакта. Для изучения распределения температуры по глубине трущихся тел применялась схема трения «палец - диск» (рис. 1, а). Пластика из сапфира толщиной 1 мм или стекла толщиной 3 мм прямоугольного сечения контактировала с плоской поверхностью вращающегося металлического или стеклянного диска толщиной 7 мм и диаметром 180 мм.

При определении температуры вспышки и средней поверхностной температуры была использована схема трения, в которой колодка в форме кольцевого сектора соприкасалась с плоской поверхностью диска (рис. 1, б). Колодка толщиной 5 мм изготавливалась из кварцевого стекла, а диски - из стали, титана, алюминия и кварцевого стекла.

Исследования термоупругой неустойчивости фрикционного контакта выполнялись с применением следующей схемы трения: боковая поверхность стального диска - поверхность, образованная макронеуровностями различной высоты - монослой стеклянных сфер различного диаметра, закрепленных на сапфировой пластинке (рис. 1, в).

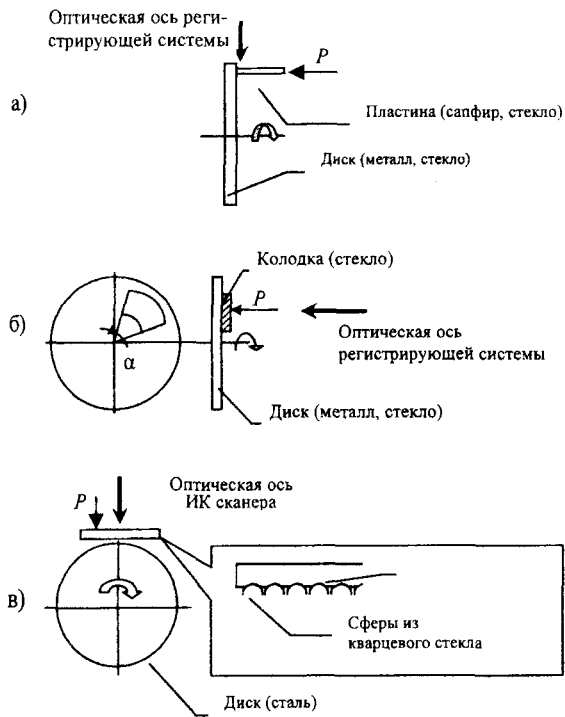


Рис. 1. Схемы контактирования образцов

Монитор представляет собой телевизионный приемник с низкочастотным уровнем входного сигнала, подключенный к оптико-электронному преобразователю через усилительно-коммутирующий блок.

Возникающее в зоне трения тепловое излучение проходит через линзу и попадает на видикон телекамеры, которая генерирует электрический сигнал. Этот сигнал преобразуется в высокочастотный сигнал и подается на монитор, формирующий телевизионное изображение зоны контакта. Изображение записывается видеоманитофоном. Устройство формирования осциллограмм яркости изображения, соединенное с выходом видеоманитофона, формирует распределение яркости изображения в двух сечениях (вдоль направления скольжения и в перпендикулярном ему направлении). Это распределение отображается цифровым осциллограмом как сигнал в милливольтгах.

При использовании схемы торцевого трения возможна регистрация температуры под поверхностью как неподвижного, так и движущегося образца. Температура измеряется вдоль линии маркера, расположенной на экране монитора перпендикулярно направлению скольжения. Линия маркера может перемещаться по изображению исследуемого участка зоны контакта вдоль вектора скорости скольжения (рис. 3). Реально профили сопрягаемых поверхностей не видны на экране монитора, так как разрешение регистрирующей системы по линейным размерам составляет 5 мкм, что на порядок превышает величину максимального отклонения профиля. Поэтому нельзя точно определить, установлен ли маркер на пятно контакта или рядом с ним. В сечении дорожки трения, выбранном с помощью маркера, могут находиться несколько пятен, так что регистрируется температура, усредненная по этим пятнам.

Экспериментальная установка. Экспериментальный комплекс, реализующий метод оптико-электронного сканирования, состоит из двух основных блоков - высокоскоростной машины трения и системы регистрации температурного поля (рис. 2). Машина трения позволяет плавно изменять скорость скольжения в диапазоне 1...100 м/с. Коэффициент трения регистрируется тензодатчиками, включенными в полумостовую схему тензометрического усилителя ТА-5, с которого сигнал поступает на светолучевой осциллограф.

Система регистрации температурного поля включает оптико-электронный преобразователь (ОЭП), монитор (М), видеоманитофон (ВМ), усилитель (У), устройство формирования осциллограмм яркости изображения (УФО) и цифровой запоминающий осциллограф С9-8 (ЦО).

В состав оптико-электронного преобразователя входят поворотная головка с дополнительными объективами увеличением $\times 4...25$ и телевизионная камера КТП-62, оптическая ось которой совпадает с оптической осью объектива. Преобразователь крепится на специальной стойке с возможностью перемещения в вертикальном и горизонтальном направлениях. Допускается также поворот оптической оси преобразователя на 90° .

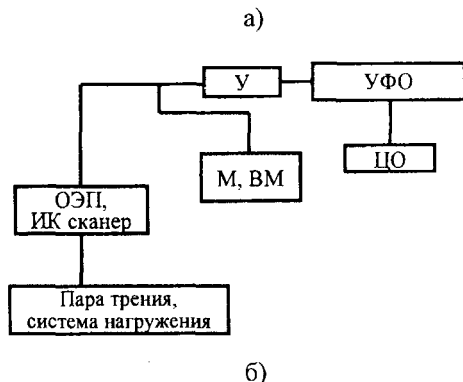


Рис. 2. Экспериментальная установка: а - общий вид; и б - блок-схема

Для исследования распределения температуры поверхностного слоя материала поперек дорожки трения оптико-электронный преобразователь поворачивается на 90° , чтобы его оптическая ось была параллельна вектору скорости скольжения. Измеряется температура на заданной глубине под поверхностями обоих образцов в различных сечениях дорожки трения, выбранных с помощью маркера, затем строится распределение температуры по ширине дорожки.

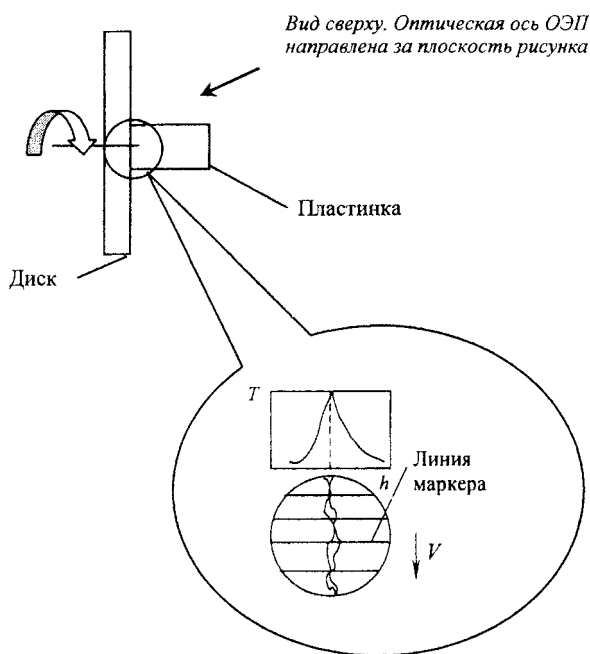


Рис. 3. Схема измерения температуры под поверхностью элементов пар трения

Калибровка измерительной системы проводится с использованием оптического пирометра. Пирометр служит эталонным источником излучения и устанавливается в поле зрения оптико-электронного преобразователя взамен пары трения. Яркостная температура источника пересчитывается в реальную температуру с учетом отражательной способности исследуемых материалов.

Средняя температура поверхности трения определяется при использовании схемы (рис. 1, б), в которой оптико-электронный преобразователь заменяется фотодиодом ФД-119, помещенным в сосуд Дьюара и охлаждаемым до температуры минус 196°C . Тепловое излучение, генерируемое в зоне трения, проходит через линзу и попадает на фотодиод, который преобразует энергию излучения в электрический сигнал. Сигнал поступает на вход усилителя, а затем на осциллограф. Данное устройство измеряет температуру, превышающую температуру окружающей среды на $1...5^\circ\text{C}$. Для

тарировки устройства используется модель абсолютно черного тела, которая размещается таким образом, чтобы ее геометрическая ось совпала с оптической осью фотодиода. Линза фокусируется на излучающую поверхность, затем модель нагревается (ее температура измеряется при помощи термопары) и регистрируется значение сигнала на выходе фотодиода.

Для исследования термоупругой неустойчивости в контакте плоской поверхности и поверхности с регулярным рельефом используется ИК-сканер «THERMOVISION-470» фирмы «AGEMA» (Швеция), оснащенный дополнительной оптической системой. Сканер регистрирует излучение в диапазоне $6...12\text{ мкм}$, что соответствует интервалу температур от минус 30 до плюс 1500°C .

Применение диагностического комплекса для изучения температурных полей в зоне трения.

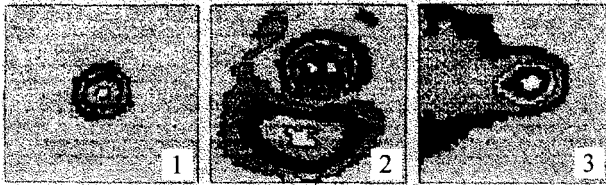
Распределение температуры по поверхности трения полиамида в контакте с сапфиром при различных режимах нагружения представлено на рис. 4, а. При низких значениях нормальной нагрузки и скорости скольжения (см. рис. 4, а, кадр 1) распределение температуры на единичном пятне контакта и в его окрестности может быть представлено в виде концентрично расположенных замкнутых кольцевых полос (изотерм). Изотермы несколько вытянуты в направлении относительного перемещения тел. Максимум температуры наблюдается в центре пятна контакта, а по мере удаления от центра температура быстро убывает. Отметим, что максимальная температура, регистрируемая вблизи центра единичного пятна, несколько занижена (на $5...15\%$, в зависимости от режимов нагружения и материалов пары трения), что связано с низкой разрешающей способностью сканера по линейным размерам.

Благодаря высокой теплопроводности сапфира и низкой теплопроводности полиамида площадь поверхности трения, на которую распространяется теплота от единичного локального источника, незначительна, по сравнению с номинальной площадью контакта, и составляет около 3% . С увеличением нагрузки (см. рис. 4, а, кадр 2) область распространения тепловой волны расширяется, появляются новые пятна контакта, способствующие перераспределению давления в зоне трения.

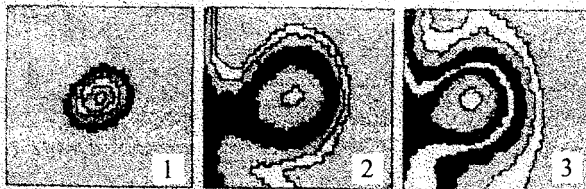
Изменение скорости скольжения приводит к существенному изменению температурного поля (см. рис. 4, а, кадр 3). С возрастанием скорости v увеличиваются размеры локальных источников теплового излучения, что может быть связано с повышением доли пластической деформации контактирующих неровностей, так как на пятне контакта достигается высокая температура. Несмотря на уменьшение времени контактирования неровностей, тепловая волна распространяется на значительно больший участок поверхности трения полиамида.

Изотермы, расположенные вблизи источника тепла, вытягиваются в направлении скольжения, принимая форму эллипса. Наиболее плотное расположение изотерм наблюдается перед зоной вступления неровностей в контакт. В этой области градиент температуры по радиусу пятна достигает наибольшего значения (при $v = 30$ м/с; $\text{grad } T = 550$ град/мм). При высоких скоростях скольжения периферийные изотермы размыкаются и ориентируются вдоль направления скольжения, а за зоной выхода неровностей из контакта образуется область квазистационарной температуры.

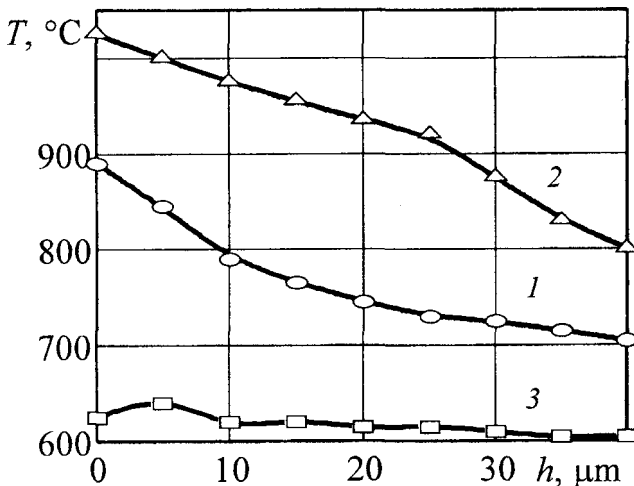
При трении сапфира по полиэтилену распределение температуры по контактной площадке принципиально не отличается от вышеописанного. Температурные поля на поверхностях трения полиамида и полиэтилена отличаются лишь размерами



а)



б)



в)

Рис. 4. Распределение температуры в окрестностях пятна контакта сапфир - полиамид (а); сапфир - полиэтилен (б); по глубине неподвижного образца из кварцевого стекла в контакте с металлом (в):
 а - кадр 1 - $P = 0,29$ МПа, $v = 8$ м/с; 2 - $P = 0,5$ МПа, $v = 8$ м/с;
 3 - $P = 0,29$ МПа, $v = 30$ м/с;
 б - кадр 1 - $P = 0,16$ МПа, $v = 4$ м/с; 2 - $P = 0,16$ МПа, $v = 20$ м/с;
 3 - $P = 0,26$ МПа, $v = 8,4$ м/с;
 в - кадр 1 - стекло - титан, $v = 18$ м/с; 2 - стекло - алюминий,
 $v = 22$ м/с; 3 - стекло - сталь, $v = 20$ м/с; $P = 0,1$ МПа

единичных пятен контакта и областей распространения тепла, что обусловлено различием их механических и теплофизических свойств. Из рис. 4, а, кадр 1 и рис. 4, б, кадр 1 видно, что в контакте сапфир - полиэтилен тепло распространяется на более обширную область, чем в контакте сапфир - полиамид, несмотря на то, что в первом случае нормальная нагрузка, скорость скольжения и коэффициент трения значительно ниже.

Распределение температуры по глубине поверхностных слоев элементов фрикционной пары и положение максимума кривой распределения определяются свойствами сопрягаемых материалов и режимами нагружения пары. Так, при трении неподвижного образца из кварцевого стекла по вращающемуся титановому диску зависимость температуры под поверхностью трения стекла от глубины отображаются монотонно убывающими кривыми (рис. 4, в, кривая 1). Это указывает на то, что теплота генерируется в очень тонком (толщиной в несколько микрометров) поверхностном слое стекла.

Для пары трения стекло - алюминий также характерны зависимости без подповерхностных температурных максимумов. Кривую распределения температуры по глубине можно разделить на два участка (рис. 4, в, кривая 2), градиенты температуры на которых различаются в несколько раз. По положению условной границы между более пологим и более крутым участками кривой можно оценить толщину интенсивно нагреваемого и деформируемого слоя. С уменьшением номинального давления и ростом скорости скольжения она уменьшается, что может быть обусловлено меньшим внедрением неровностей поверхности контртела в поверхностный слой стекла и уменьшением времени жизни фрикционных связей.

Распределение температуры с подповерхностным максимумом характерно

для пары трения кварцевое стекло - сталь. Максимум регистрируется на глубине $\gg 5$ мкм под поверхностью трения стекла (рис. 4, в, кривая 3). Расположение зоны наибольшего тепловыделения коррелирует с положением зоны максимальных касательных напряжений (глубина 10... 12 мкм), рассчитанным исходя из теоретических представлений М.М. Саверина. С ростом скорости скольжения эта зона приближается к поверхности трения стекла, поэтому теплота генерируется в очень тонком поверхностном слое материала, а зависимость температуры от глубины становится монотонно убывающей.

Выводы. Реализация метода оптико-электронного сканирования позволила создать исследовательский комплекс и методику диагностики теплового состояния высокоскоростных узлов трения, позволяющие изучать тепловые явления в зоне фактического контакта и в тонких поверхностных слоях трущихся тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Завистовский В.Э., Холодилов О.В., Богданович П.Н. Физика отказов механических систем. - Мн.: Технопринт, 1999. - 212 с.
2. Quinn T., Winer W. Temperatures of «hot spots» in a sliding contact Transactions of ASME // Journal of Tribology. - 1987. - № 109. - P. 290 - 298.
3. Chichinadze A., Goryunov V., Ginzburg A. The use of a pyrometer to determine the temperature of rubbing surfaces // Problems in Mechanical Engineering and Automation. - 1990. - № 12. - P. 40 - 46.
4. Bogdanovich P.N., Tkachuk D.V. Investigation of temperature field in friction units by optical-electron scanning technique // Balttrib'99: International conference. - Kaunas, 1999. - P. 250 - 256.