

ментов каркаса вычислены для сплошного бетонного сечения без учета арматуры. Динамический модуль упругости бетона принят равным нормативному значению  $E_G = 2.05 \cdot 10^7$  КН/м<sup>2</sup>. Узловые приведенные массы, вычислялись без учета и с учетом полезной нагрузки. В результате решения первой задачи динамики вычислены собственные частоты и собственные формы свободных колебания каркаса. Парциальные частоты собственных колебаний балок и плит перекрытия вычислялись как для шарнирно открытых однопролетных балок с равномерно распределенной массой. Было установлено, что упругое опирание имеет и балок на элементы каркаса ведет к снижению собственных частот колебаний. Однако уровни вибраций не снижаются, т.к. наблюдается резонанс по всем собственным формам в частотном диапазоне до 80 Гц. Спектр собственных частот каркаса имеет сгущенный характер, что связано с горизонтально-крутильными формами колебаний. В первом приближении можно сказать, что все частоты возмущения можно считать резонансными. Каркас АБК исследовался на вибрационное кинематическое возмущение. При этом суммарное перемещение масс сооружения состоит из переносного и относительного движений, дифференциальное уравнение которого в матричной форме

$$M \cdot \frac{d^2}{dt^2} [w(t) + y(t)] + k[w(t) + y(t)] + R(t) = 0,$$

где  $R(t)$  - матрица реакций от смещений опор,  
 $w(t)$  - матрица переносной составляющей перемещения,  
 $y(t)$  - матрица относительной составляющей перемещения,  
 $M$  - матрица масс.

В результате решения дифференциального уравнения для каждой гармонике возбуждения получены значения амплитуд относительных и суммарных узловых перемещений каркаса АБК. Получены собственные частоты и амплитудные значения перемещений плит перекрытия, анализ которых показал, что уровень виброперемещений панелей перекрытий остается высоким из-за наличия резонансных колебаний.

**Литература.** 1. Динамический расчет зданий и сооружений. Справочник проектировщика./ Под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. - М.: Стройиздат, 1984. - 303 с. 2. Инструкция по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки. - М.: Стройиздат, 1970. - 188 с. 3. Вибрации в технике. Справочник. т.1/ под ред. В.В. Болотина. - М.: Машиностроение, 1978 - 352 с.

УДК 621.891:539.621

П.Н. Богданович, Д.В. Ткачук

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ГЛУБИНЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРЫ ТРЕНИЯ СТЕКЛО – ТИТАН

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого  
НАН Беларуси, Гомель, Беларусь*

**Введение.** Для правильного понимания природы изнашивания тел при высокоскоростном трении необходимы сведения о температурных полях, развивающихся в тонких поверхностных слоях контактирующих материалов. В частности, важно выяснить, где находится источник теплоты трения – на математической границе раздела тел или под этой границей, в материале одного из них. В теоретических исследованиях

представлены как первая [1-3], так и вторая точки зрения [4-6]. Очевидно, что результат расчета существенно зависит от расположения теплового источника. Следовательно, основанием для выбора какого-либо из указанных подходов могут служить только результаты эксперимента. Известные экспериментальные данные содержат информацию о распределении температуры в достаточно толстых слоях материала [7] (термовизионные исследования торцевого контакта труб) либо об объемной температуре в различных точках под поверхностью трения [8] (использование системы термопар). Таким образом, вопрос об экспериментальной оценке температурных полей в тонких термонапряженных поверхностных слоях трущихся тел остается открытым, а его решение требует применения регистрирующей аппаратуры с высоким разрешением по линейным размерам.

Целью данного исследования является получение и анализ экспериментальных данных о распределении температуры по глубине сопряженных тел, влиянии режимов нагружения, механических и теплофизических свойств материалов пары трения на температурное поле, развивающееся в поверхностных слоях толщиной порядка десятков микрометров.

**2. Объекты и методы экспериментальных исследований.** В качестве объектов исследования выбраны сапфир и кварцевое стекло. Выбор этих материалов обусловлен, в первую очередь, их прозрачностью в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра, что является необходимым условием для регистрации излучения зоны контакта методом оптико-электронного сканирования. Сопрягаемое с пластинкой из стекла или сапфира контртело выполнено в виде диска из титана.

В работе использовался исследовательский комплекс, созданный на базе высокоскоростной машины трения, позволяющей проводить фрикционные испытания при скоростях скольжения до 100 м/с. Фрикционное нагружение контакта осуществлялось по схеме торцевого трения – неподвижный образец (пластинка из сапфира или стекла) прижимался своим краем к плоской поверхности вращающегося металлического диска. Скорость скольжения изменялась в диапазоне 0-50 м/с, номинальное давление на контакте достигало 0,3 МПа. Коэффициент трения измерялся тензометрическим способом. Для измерения температуры применялся метод оптико-электронного сканирования [9].

**3. Температурное поле в поверхностном слое неподвижного образца.** Распределение температуры по глубине неподвижного стеклянного образца при трении его по диску из титана представлено на рис. 1. Зависимости температуры от глубины под поверхностью трения отображаются монотонно убывающими кривыми. Ряд исследователей указывают на возможность существования подповерхностных источников теплоты, объясняя это обстоятельство локализацией максимально напряженной точки на некоторой глубине от поверхности трения [6, 10]. Отсутствие максимумов на полученных зависимостях  $T(h)$  свидетельствует о том, что в исследованном диапазоне нагрузочно-скоростных параметров большая часть теплоты трения выделяется на площадках фактического контакта, а интенсивность подповерхностных источников сравнительно невелика, либо они отсутствуют.

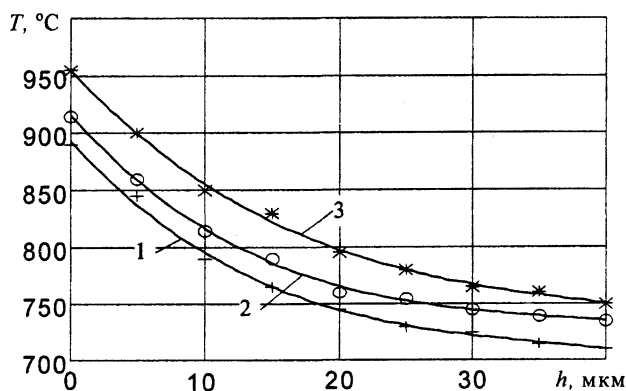


Рис. 1. Распределение температуры по глубине неподвижного образца (контакт стекло – титан;  $V = 18$  м/с; 1 -  $p = 0,1$  МПа; 2 -  $p = 0,2$  МПа; 3 -  $p = 0,3$  МПа).

Важной особенностью регистрируемого температурного поля является его неоднородность в направлении

нормали к поверхности трения. Градиент температуры в этом направлении, в слое толщиной порядка нескольких десятков микрометров, очень велик. Его значения достигают  $5 \cdot 10^3$  с/мм. Увеличение нагрузки на контакт вызывает рост температуры в точках поверхностного слоя за счет возрастания интенсивности тепловыделения в зоне контакта. Графически это отображается смещением кривой  $T(h)$  в более высокотемпературную область. При этом наблюдается незначительное увеличение температурного градиента, что является следствием указанного повышения температуры и инерционности процессов теплопроводности от поверхности контакта вглубь сопряженных тел.

Представляет интерес анализ установленной немонотонной зависимости температуры, измеренной на заданной глубине от поверхности трения, от скорости скольжения. Для пары трения стекло – титан она представлена на рис. 2. Поведение начальных участков кривых (до  $V = 20$  м/с) не требует особого объяснения – температура растет

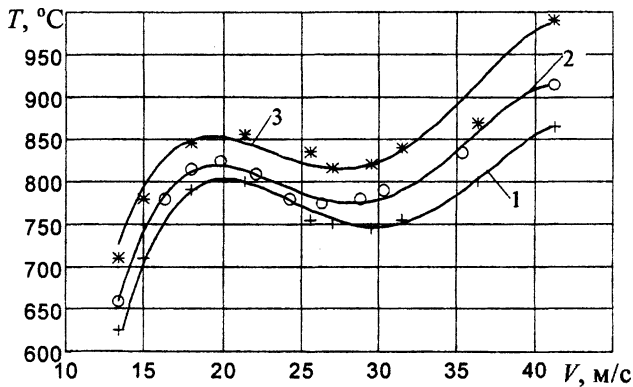


Рис. 2. Зависимость температуры в материале неподвижного образца на глубине 10 мкм под поверхностью трения от скорости скольжения (контакт стекло – титан; 1 –  $p = 0,1$  МПа; 2 –  $p = 0,2$  МПа; 3 –  $p = 0,3$  МПа).

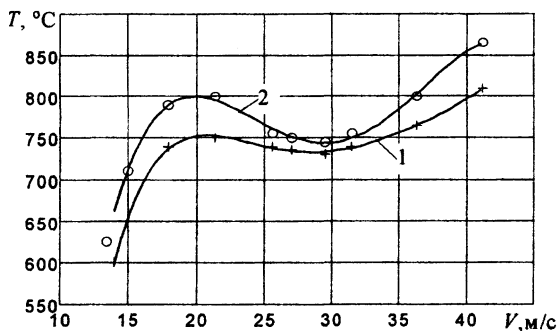


Рис. 3. Зависимость  $T(V)$  на различной глубине под поверхностью трения (контакт стекло – титан;  $p = 0,1$  МПа; 1 –  $h = 20$  мкм; 2 –  $h = 10$  мкм).

вследствие увеличения интенсивности тепловыделения с ростом скорости скольжения. Монотонный подъем температуры сменяется небольшим ее спадом в довольно широком интервале скоростей (от 20 до 30 м/с). Отметим, что при схеме торцевого трения с малым коэффициентом взаимного перекрытия важную роль в охлаждении контакта играет теплоотвод с поверхности вращающегося диска, осуществляющийся за счет конвекции. Очевидно, что коэффициент теплоотдачи при этом не постоянен, а зависит от скорости вращения диска – с ее увеличением коэффициент теплоотдачи возрастает. Следовательно, возрастает теплоотвод с поверхности, а участки поверхности диска, прошедшие зону фрикционного нагрева, возвращаются в нее охлажденными до более низкой температуры, чем в случае меньшей скорости. Это приводит к перераспределению тепловых потоков в зоне контакта в пользу диска, а значит, к уменьшению температуры в поверхностном слое неподвижного образца. Подтверждением этого предположения могут служить представленные на рис. 3 данные, из которых следует, что эффект снижения температуры, связанный с конвективным охлаждением поверхности контртела,

ослабевает с удалением от поверхности вглубь материала.

В области скоростей больше 30 м/с температура снова растет, но не так быстро, как на начальном участке зависимости. Установлено, что для пары трения стекло – титан коэффициент трения почти постоянен в интервале скоростей 10-30 м/с, а при более высокой скорости он начинает возрастать. Фрикционный нагрев стекла приводит к протеканию на пятнах фактического контакта двух процессов: с одной стороны, снижа-

ется сопротивление фрикционной связи срезу, с другой стороны, размягчение стекла в локальных микрообъемах, прилегающих к вершинам контактирующих неровностей, влечет за собой рост фактической площади контакта. Так как сопротивление срезу уменьшается незначительно, в результате совместного действия этих процессов адгезионная составляющая коэффициента трения возрастает. Кроме того, с размягчением материала увеличивается доля пластической деформации, что дает дополнительный вклад в теплообразование на контакте. Это обстоятельство вместе с ростом коэффициента трения, по нашему мнению, может объяснить указанное повышение температуры. Теплоотвод с поверхности контртела, увеличивающийся с ростом скорости скольжения, частично компенсирует действие указанных факторов, в результате чего температура возрастает медленнее, чем на начальном участке зависимости.

Увеличение номинального давления вызывает смещение графика в область более высоких температур вследствие возрастания тепловыделения. При этом минимум зависимости  $T(V)$  незначительно смещается в область более низких скоростей. Это может быть вызвано более быстрым ростом площади фактического контакта, а следовательно, возрастанием коэффициента трения при меньшей скорости, чем в случае малых контактных давлений (рис. 2, кривая 1).

#### 4. Выводы:

1. при высокоскоростном трении тонкие (толщиной порядка десятков микрометров) поверхностные слои материала неподвижного образца испытывают интенсивное тепловое воздействие;

2. температурное поле в поверхностном слое материала является сильно неравномерным – наблюдается очень большой (до  $10^4$  °С/мм) градиент температуры в направлении нормали к поверхности трения;

3. с удалением от поверхности трения вглубь материала температура монотонно убывает, что свидетельствует о слабом влиянии подповерхностных источников тепла на температурное поле;

4. немонотонная зависимость температуры под поверхностью контакта от скорости скольжения объясняется интенсивным конвективным теплоотводом с поверхности вращающегося контртела и поведением коэффициентов трения фрикционных пар в зависимости от скорости и температуры.

**Литература.** 1. Blok H. Theoretical study of temperature rise at surfaces of actual contact under oiliness lubricating conditions // Proc. Inst. Mech. Eng.— 1937.— Vol. 2.— P. 222—235. 2. Jaeger J.C. Moving heat sources and friction temperature // Proc. Roy. Soc. N.S.W.— 1942.— Vol. 76.— P. 203—224. 3. Archard J.F. The temperature of rubbing surfaces // Wear.— 1959.— Vol. 2, № 6.— P. 438—455. 4. Кудинов В.А. Динамика станков.— Москва: Машиностроение, 1967.— 344 с. 5. Протасов Б.В. Энергетические соотношения в трибосопряжении и прогнозирование его долговечности.— Саратов: Саратовский политехнический институт, 1979.— 86 с. 6. Протасов Б.В., Крагельский И.В. О генерации тепла при внешнем трении // Трение и износ.— 1981.— Т. 2, № 1.— С. 5—11. 7. Sadowski J. Badania termowizyjne otoczenia obszaru kontaktu tracych sie cia // Zag. eksploat. masz.— 1986.— № 3—4.— S. 461—470. 8. Балакин В.А. Трение и износ при высоких скоростях скольжения.— М.: Машиностроение, 1980.— 136 с. 9. Богданович П.Н., Белов В.М. Особенности температурных полей на локальных участках контакта сапфир – металл // Докл. АН Беларуси.— 1993.— Т. 37, № 3.— С. 114—117. 10. Rigney D.A., Hirth J.P. Plastic deformation and sliding friction of metals // Wear.— 1979.— Vol. 53.— P. 345—370.