

УДК 621.891

П.И. Маленко, канд. техн. наук, доц., (4872) 33-17-85, [malenko@tsu.tula.ru](mailto:malenko@tsu.tula.ru)  
(Россия, Тула, ТулГУ)

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ТРЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ РЕСУРСНОГО СМАЗЫВАНИЯ**

*Рассмотрены вопросы определения температуры вспышки  $T_{всп}$  на единичных микроконтактах при трении скольжения со смазочным материалом. Установлено, что графики изменения  $T_{всп}$  носят характер высокочастотных температурных колебаний, названных процессом термоциклирования. Определен характер проникновения процесса термоциклирования в глубь твердого тела. Предложено определение понятия “поверхностная температура  $T_{пов}$ ” как температуры на нижней части температурного поверхностного слоя.*

*Ключевые слова: температурные поля, процесс термоциклирования, температура вспышки, поверхностная температура.*

Для многих механизмов применяется ресурсное смазывание, то есть одноразовое смазывание на ресурс узла перед началом работы. Вследствие воздействия жестких режимов эксплуатации происходит трансформация видов трения со смазочным материалом: от трения с гидродинамической смазкой до трения с граничной смазкой. Наибольший практический интерес при этом представляет трение с граничной смазкой, так как именно при наличии данного вида трения при работе механизмов возникает опасность проявления адгезионных явлений, ведущих далее к схватыванию и заеданию, то есть к возникновению аварийных ситуаций.

Опасность проявления адгезионных свойств трущихся материалов особенно высока при превалировании процессов изнашивания смазочного материала в виде тонких защитных пленок на микроконтактах (вследствие механохимических и других процессов) над его восстановлением (адсорбцией, диффузией и другими).

Температурное поле в зоне контакта оказывает решающее воздействие на характер трения и износа. Вместе с тем, реальную температуру в зоне контакта трудно измерить, так как зоны контакта подвержены непрерывным изменениям, и отвод теплоты, возникающей в результате работ сил трения, нестационарен. Экспериментально о величине температуры на поверхности трения можно судить на основании измерения косвенных величин одним из следующих методов [1]:

1) определение физических, химических и металлографических изменений в материале поверхностного слоя в результате воздействия сил трения;

2) измерение температуры на некотором расстоянии от поверхности контакта, для чего необходимо знать градиент температур в поверхност-

ном слое;

- 3) измерение температуры методом естественной термопары;
- 4) использование скользящей термопары;
- 5) другие методы.

Каждому из перечисленных методов присущи характерные недостатки, снижающие достоверность полученных результатов.

С учетом указанных обстоятельств разработаны аналитические методы определения температурных полей в зоне трения.

Однако анализ расчетных зависимостей показывает, какие существенные ошибки могут быть допущены, если неточно учитывать значения коэффициентов теплопроводности, теплоемкости и трения, в особенности, когда значения данных параметров определены при наличии тонких окисных, смазочных и иных пленок на поверхности.

При расчетном методе используется следующая зависимость, определяющая максимальную температуру на фрикционном контакте [2]:

$$T_{\max} = T_0 + T_{\text{об}} + T_{\text{пов}} + T_{\text{всп}}, \quad (1)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды;  $T_{\text{об}}$  – объемная температура;  $T_{\text{пов}}$  – поверхностная температура;  $T_{\text{всп}}$  – температура вспышки, то есть температура на фактическом пятне контакта.

Из слагаемых  $T_{\max}$  наибольшую сложность и наибольший интерес представляет определение  $T_{\text{всп}}$ , особенно для трения в условиях ресурсного смазывания, когда  $T_{\text{об}}$  и  $T_{\text{пов}}$  невелики и решающее значение на коэффициент трения  $f_{\text{тр}}$  оказывает  $T_{\text{всп}}$ . Помимо этого, в зоне фактического контакта тепловые напряжения становятся пропорциональными  $T_{\text{всп}}$ , что приводит к трещинообразованию.

Для строгого аналитического определения температуры  $T_{\text{всп}}$  необходимо предварительно сформулировать ряд условий:

- 1) выбрать форму геометрии единичного контакта;
- 2) дать математическое описание движущегося источника теплоты трения;
- 3) учесть отток тепла из микровыступа в окружающую среду (смазку);
- 4) описать процесс распространения температуры в приповерхностную область;
- 5) дать оценку поверхностной температуры  $T_{\text{пов}}$  как результата трансформации  $T_{\text{всп}}$ .

На практике обычно прибегают к ряду упрощений. Что касается геометрической формы единичного контакта, то общепринятой считается некоторая идеализированная схема, согласно которой микровыступы аппроксимируются цилиндрическими поверхностями, по торцам которых и происходит тепловой контакт (рис. 1).

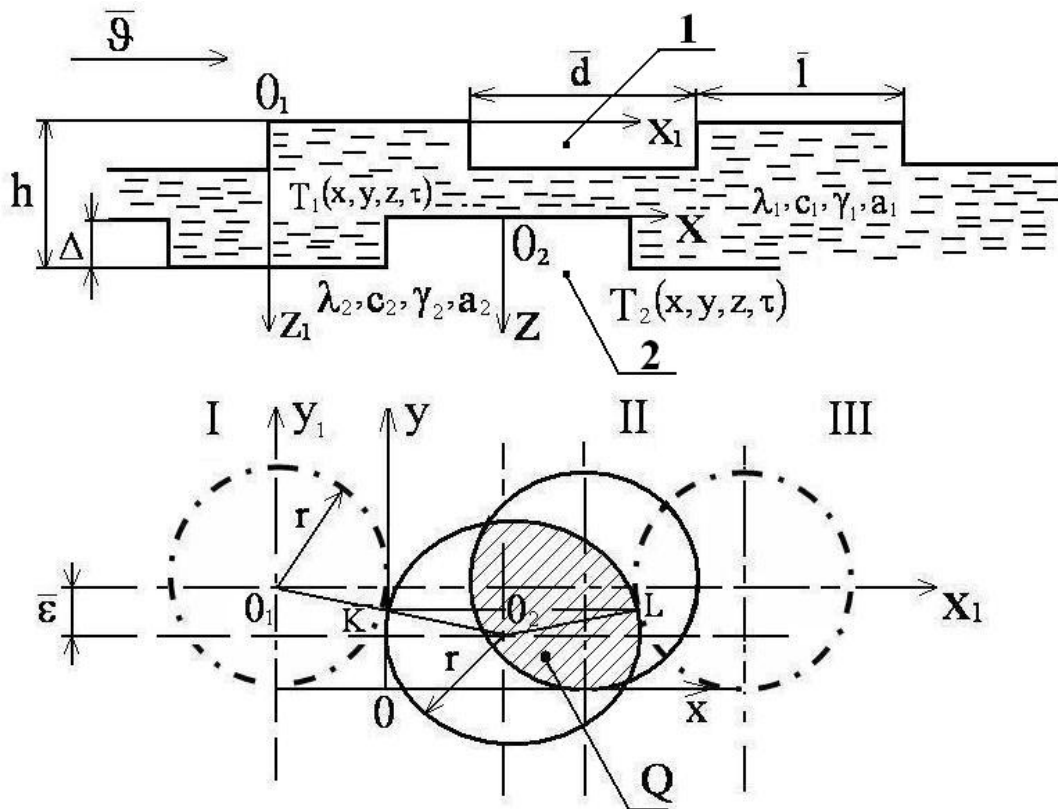


**Рис. 1. Расчетная схема для определения температур на микроконтактах:**

**I – начало контакта; II – промежуточное положение подвижного контакта; III – конец контакта;**

**1 – подвижный контакт, 2 – неподвижный контакт**

Подвижный контакт, связанный с подвижной системой координат  $(x_1, y_1, z_1)$ , перемещается относительно неподвижного контакта с координатами  $(x, y, z)$  со скоростью  $\bar{g}$ . В зоне перекрытия подвижного и неподвижного контактов (заштрихованная площадь на рис. 1) действует подвижный источник тепла, вызванный трением в смазке, с удельной мощностью  $\bar{W}$ . Теплота трения с непокрытых поверхностей контактов переходит в поступающую в зазор  $h$  смазку и уносится из зазора. Теплофизические характеристики смазки и твердого тела:  $\lambda_1 = f(T)$  – коэффициенты теплопроводности;  $c_1, c_2$  – теплоемкости;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности;  $a_1, a_2$  – коэффициенты температуропроводности. Численные значения теплофизических характеристик для твердого тела – стали 30ХН2МФА с высокопрочным химико-термическим покрытием и для смазки – машинного масла СВ – приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Теплофизические характеристики материалов**

| №<br>п/п | Марка<br>материала   | Теплофизические характеристики |                                             |                                          |                                       |
|----------|----------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------|
|          |                      | $c$ ,<br>Дж/(кг·°C)            | $\rho \cdot 10^{-6}$ ,<br>кг/м <sup>3</sup> | $\lambda \cdot 10^{-2}$ ,<br>Дж/(м·с·°C) | $a \cdot 10^4$ ,<br>м <sup>2</sup> /с |
| 1        | Сталь<br>30ХН2МФА    | 475                            | $7,7 \cdot 10^{-3}$                         | 0,435                                    | 0,119                                 |
| 2        | Машинное<br>масло СВ | 2000                           | $0,85 \cdot 10^{-3}$                        | $1,10 \cdot 10^{-3}$                     | $0,68 \cdot 10^{-3}$                  |

Вероятностный характер геометрических характеристик микроконтактов учитывался с использованием средних значений (математических ожиданий):  $\bar{d}$  – средний диаметр микровыступа,  $\bar{l}$  – среднее расстояние между микровыступами,  $\bar{\varepsilon}$  – средняя величина относительного смещения центров подвижного и неподвижного контактов (нецентральный контакт). Данные параметры определялись путем статистической обработки профилеграмм поверхностей. Размер  $KL$  определяет максимальную длительность контактирования:  $\tau_{\max} = \frac{KL}{\vartheta}$ . Исходя из геометрических соотношений установлено, что

$$KL = \frac{\bar{d}^2}{\sqrt{\bar{d}^2 - \bar{\varepsilon}^2}}. \quad (2)$$

Принимается, что высоты микронеровностей сопоставимы с величиной зазора  $h$  между контактирующими телами. Следовательно, будет иметь место граничное, смешанное и частично гидродинамическое трение.

Мощность теплового источника определяется по формуле

$$W = c_2 \rho_2 \frac{T_{\text{соб}}}{\tau_{\text{конт}}}, \quad (3)$$

где  $c_2$ ,  $\rho_2$  – соответственно теплоемкость и плотность смазки;  $T_{\text{соб}}$  – собственная температура смазки.

Так как в зазоре поля температур  $T_{\text{соб}}$  и скоростей  $\vartheta$  переменны по оси  $z$ , то следует взять их средние значения. В результате преобразований получим следующую зависимость для средней мощности движущегося источника тепла:

$$\bar{W} = 0,565 c_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}} \bar{T}_{\text{соб}} \frac{\vartheta}{d}. \quad (4)$$

Отток тепла трения из микровыступа в движущуюся смазку будет происходить двояким образом. Во-первых, из цилиндрической поверхности микровыступа, во-вторых, из свободной части торцевой поверхности

неподвижного микровыступа, не находящейся в контакте с контрвыступом.

Процессы распространения температур в приповерхностной области и формирования поверхностной температуры определяются из решения системы дифференциальных уравнений теплопроводности с соответствующими краевыми условиями.

Решение данной системы в аналитической форме сталкивается с трудностями. В связи с этим применялся один из численных методов решения, а именно метод конечных разностей (метод сеток) в явном виде [3]. Численное решение было реализовано в виде программного продукта на языках программирования Бейсик и Паскаль.

В результате численного решения были получены искомые графики изменения температур в центре неподвижного контакта – точке  $O_2$  (см. рис. 1) при различных сочетаниях параметров: скорости  $\vartheta = 1 \dots 10$  м/с; толщины смазочного слоя  $h = (5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-2}) \cdot 10^{-2}$  м; диаметра микровыступа  $\bar{d} = (8 \dots 16) \cdot 10^{-6}$  м; смещения центров контактирующих микровыступов  $\bar{\varepsilon} = (3 \dots 8) \cdot 10^{-6}$  м. Полученные температурные зависимости имеют общие закономерности, установить которые позволяют графики, приведенные на рис. 2 ( $\vartheta = 5$  м/с,  $h = 5 \cdot 10^{-6}$  м,  $\bar{d} = \bar{l} = 16 \cdot 10^{-6}$  м,  $\bar{\varepsilon} = 3 \cdot 10^{-6}$  м).

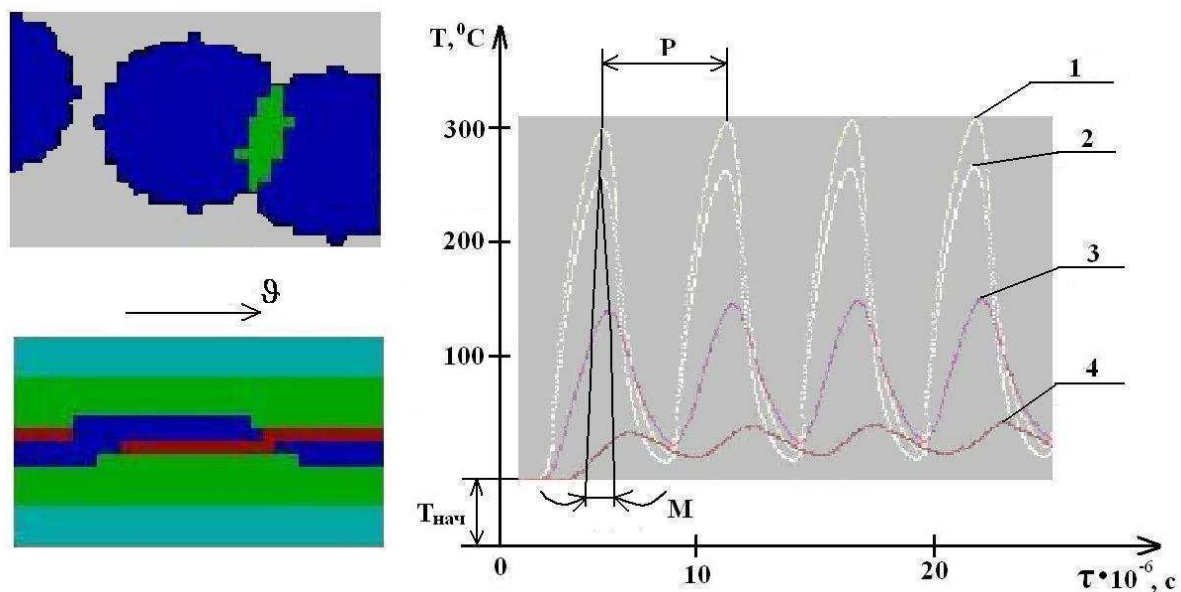


**Рис. 2. Температурные поля в центре неподвижного контакта (точка  $O_2$ ) в зависимости от времени контактирования  $\tau$  и глубины расположения  $z$  (количество моделируемых циклов  $n=4$ ):**

**1 – смазки  $T_1$ ; 2 – вспышки  $T_{всп}$ ;**

**3 – твердого тела по глубине  $z = 3 \cdot 10^{-6}$  м;**

**4 – твердого тела по глубине  $z = 6 \cdot 10^{-6}$  м**

Во-первых, температурное поле представляет собой высокочастотные синусоидальные волны, в связи с чем целесообразно классифицировать в целом весь процесс возникновения тепла и температур на микроконтактах как термоциклирование. Математическое описание процесса термоциклирования связано с теорией тепловых волн, разработанной Г. Гребером [4] и детализированной А.В. Лыковым [3]. Во-вторых, амплитуды температурных колебаний и средние значения температур уменьшаются с глубиной их проникновения в твердое тело. В-третьих, имеет место смещение волн по фазе и по глубине. В-четвертых, отмечается нестационарность процесса термоциклирования. При увеличении количества циклов нагружения  $n$  процесс термоциклирования стремится к стационарности (рис. 3).

Время достижения стационарности  $\tau_{\text{стац}}$  определялось для различных скоростей  $\vartheta$  по графикам, аналогичным графикам на рис. 3.

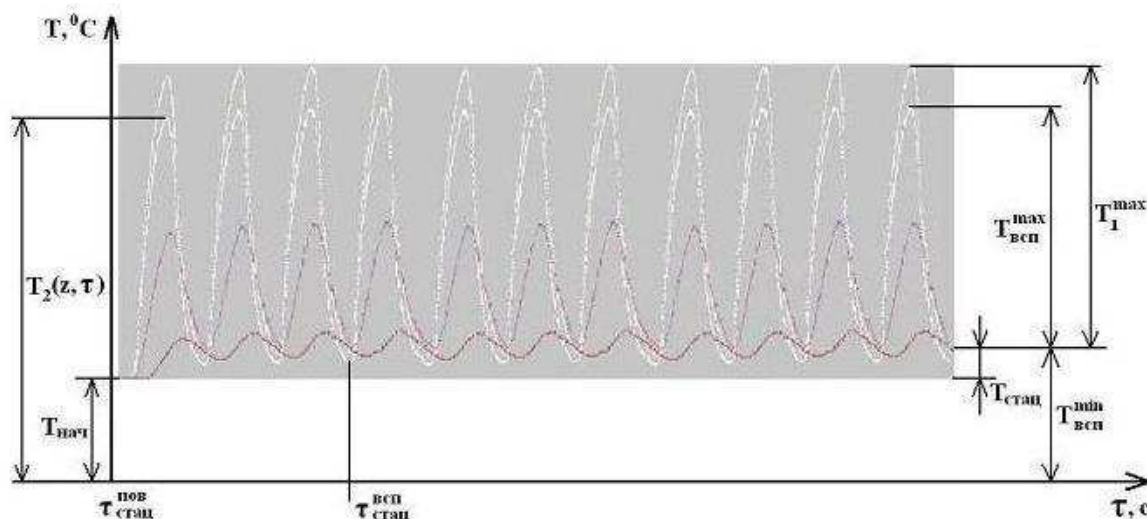


**Рис. 3. Расчетная схема для определения параметров стационарного процесса термоциклирования**

Используя теорию тепловых волн, дадим математическое описание процесса термоциклирования.

Основными параметрами теории тепловых волн являются коэффициент теплопроводности твердого тела  $a = a_2$  и период температурных колебаний

$$P = \frac{2\bar{d}^2}{\sqrt{\bar{d}^2 - \bar{\varepsilon}^2}} \cdot \frac{1}{9}. \quad (5)$$

Уравнение, описывающее колебательный процесс проникновения температуры в твердое тело на глубину  $z$ , имеет вид

$$T_{\text{отн}} = \frac{\bar{T}_{\text{всп}}}{\bar{T}_1} \cdot \operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\tau}} + \frac{T_2(z, \tau) - T_{\text{нач}}}{T_1^{\max}}. \quad (6)$$

В уравнении (6) первое слагаемое отражает процесс изменения средней температуры вспышки по глубине  $z$  твердого тела  $\bar{T}_{\text{всп}} = \frac{T_{\text{всп}}^{\max} + T_{\text{всп}}^{\min}}{2}$ ;  $\bar{T}_1 = \frac{T_1^{\max} + T_1^{\min}}{2}$ ;  $\operatorname{erfc} \frac{z}{2\sqrt{a_2\tau}}$  – дополнительная функция ошибок Гаусса.

Второе слагаемое в зависимости (6) показывает изменение относительной амплитуды колебаний  $T_{\text{всп}}$  по глубине  $z$  твердого тела:

$$\frac{T_2(z, \tau) - T_{\text{нач}}}{T_1^{\max}} = A_0 \cdot e^{-z\sqrt{\frac{\pi}{a_2P}}} \cos \left[ \frac{2\pi}{P}\tau - \left( z\sqrt{\frac{\pi}{a_2P}} + M \right) \right], \quad (7)$$

где

$$A_0 = \left( 1 + \frac{2}{H} \sqrt{\frac{\pi}{a_2P}} + \frac{2\pi}{H^2 a_2P} \right)^{-1/2}. \quad (8)$$

Смещение по фазе колебаний  $T_{\text{всп}}$  относительно колебаний температуры  $T_1$  смазки определяется по выражению

$$M = \operatorname{arctg} \left( \frac{1}{1 + H\sqrt{\frac{a_2P}{\pi}}} \right). \quad (9)$$

Параметр  $z\sqrt{\frac{\pi}{a_2P}}$  показывает смещение по фазе колебаний температуры на глубине  $z$  относительно колебаний  $T_{\text{всп}}$ .

В графическом виде зависимость (6) представлена на рис. 4. Из графика следует, что процесс изменения  $T_{\text{всп}}$  по глубине  $z$  является затухающим с длиной волны

$$\lambda_{\perp} = 2\sqrt{a_2P}. \quad (10)$$

Сущность концепции “поверхностной температуры” состоит в том, чтобы руководствуясь физическими законами, ограничить колебательный процесс по глубине некоторым размером  $z = v$ . В результате будет выделен поверхностный слой, температура на нижней границе которого принимается за температуру поверхности  $T_{\text{пов}}$ . В качестве такого размера целесообразно использовать параметр, характеризующий условную толщину прогревания однородного полуограниченного тела в стационарно-периодическом состоянии:

$$v = \sqrt{\frac{aP}{2\pi}} = 0,11\lambda_{\perp}. \quad (11)$$

По своему физическому смыслу  $v$  является коэффициентом теплоусвоения однородного тела.

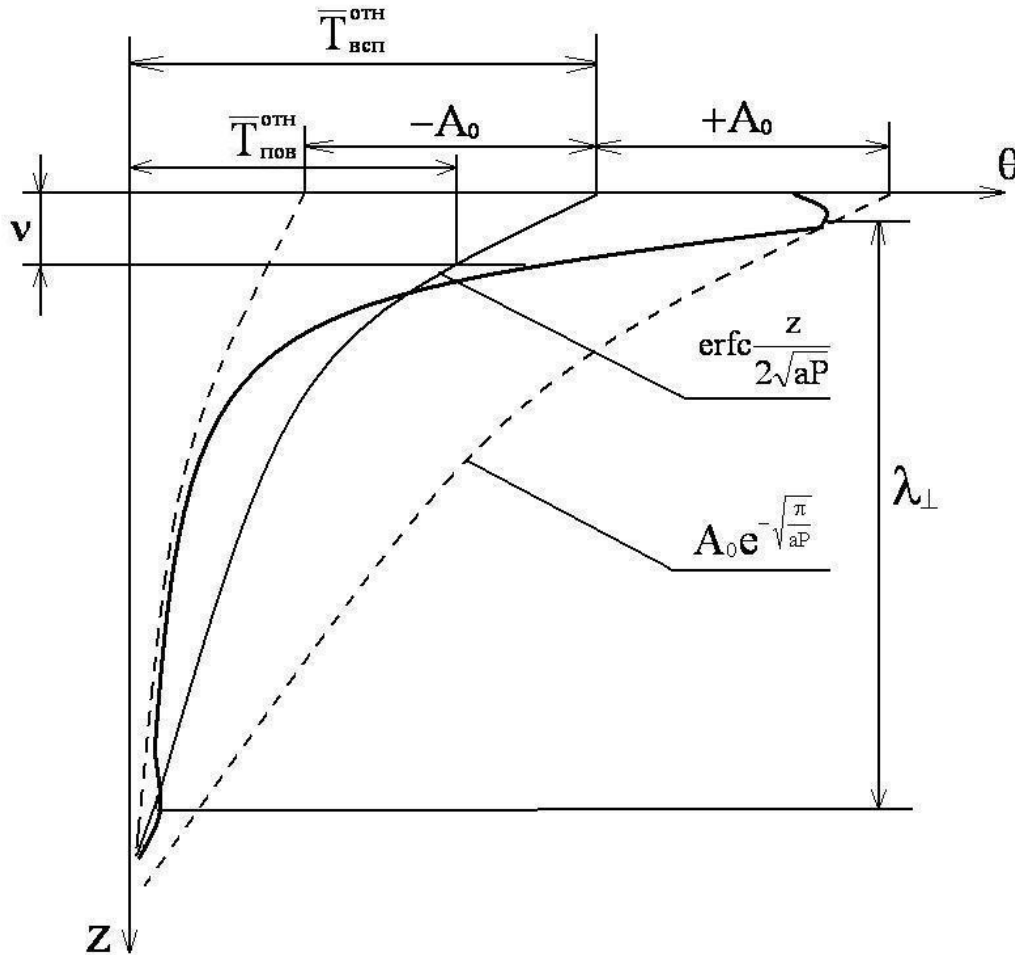


**Рис. 4. Распределение относительной температуры  $\theta$  по глубине твердого тела  $z$**

Степень уменьшения температурных колебаний  $n$  в слое толщиной  $v$  по сравнению с колебаниями на поверхности трения определяется по зависимости  $\ln n = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71$ ;  $n = 2$ . Следовательно, температурные колебания в слое  $v$  уменьшаются в два раза.

Важной характеристикой поверхностного температурного слоя  $v$  является коэффициент теплоусвоения  $K_{\psi}$ . Он показывает, какая доля тепла аккумулируется в стенке толщиной  $v$  по сравнению с бесконечно тонкой стенкой ( $v \rightarrow 0$ ). Коэффициент теплоусвоения является сложной функцией критерия Предводителя  $Pd$ :

$$K_{\psi} = f(Pd), \quad (12)$$

где  $Pd = \frac{2\pi}{aP} \cdot v^2$ .

График данной зависимости приведен в работе [3].

Отметим также, что скорости распространения тепловых волн параллельно скорости трения  $U_{\parallel}$  и  $U_{\perp}$  будут различны:

$$U_{\parallel} = \frac{\lambda}{P} = \vartheta; \quad U_{\perp} = \frac{\lambda T}{P}. \quad (13)$$

Расчеты по зависимостям (5) и (13) для различных скоростей трения сведены в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 приводит к следующим выводам. В результате действия подвижного источника тепла  $W$  формируется температура вспышки  $T_{всп}$ . В свою очередь,  $T_{всп}$ , проходя через слой толщиной  $v$ , образует поверхностный температурный слой и трансформируется в поверхностную температуру  $T_{пов}$ . Температура  $T_{пов}$  является предельной для температур твердого тела на глубинах  $z > v$ , то есть  $T_{пов} \rightarrow T(z, \tau)_{\tau \rightarrow \infty}$ . Сдвиг по фазе между  $T_{пов}$  и  $T_{пов}$  имеет направление вектора скорости  $\vartheta$ .

**Таблица 2**

**Значения параметров процесса термоциклирования ( $h = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ )**

|                                       |                      |                      |                      |                                 |                    |                    |                    |
|---------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| $\vartheta, \text{ м/с}$              | 1                    | 5                    | 10                   | $\vartheta, \text{ м/с}$        | 1                  | 5                  | 10                 |
| $\bar{T}_1, ^\circ\text{C}$           | 23                   | 160                  | 320                  | $\lambda_{\perp}, \text{ м}$    | $54 \cdot 10^{-6}$ | $27 \cdot 10^{-6}$ | $17 \cdot 10^{-6}$ |
| $T_1^{\max}, ^\circ\text{C}$          | 26                   | 182                  | 364                  | $Pd$                            | 0,97               | 0,91               | 1,0                |
| $\bar{T}_{всп}, ^\circ\text{C}$       | 19                   | 140                  | 280                  | $K_{\psi}$                      | 0,91               | 0,93               | 0,9                |
| $\bar{T}_{всп}^{\text{отн}}$          | 0,88                 | 0,88                 | 0,88                 | $U_{\parallel}, \text{ м/с}$    | 1                  | 5                  | 10                 |
| $P, \text{ с}$                        | $31,4 \cdot 10^{-6}$ | $6,28 \cdot 10^{-6}$ | $3,14 \cdot 10^{-6}$ | $U_{\perp}, \text{ м/с}$        | 1,72               | 3,8                | 5,4                |
| $A_0$                                 | 0,87                 | 0,74                 | 0,65                 | $U_{\parallel}/U_{\perp}$       | 0,58               | 1,32               | 1,85               |
| $M, \text{ рад}$                      | $0,05\pi$            | $0,08\pi$            | $0,11\pi$            | $\bar{T}_{пов}, ^\circ\text{C}$ | 14,8               | 107                | 215                |
| $v\sqrt{\frac{\pi}{aP}}, \text{ рад}$ | $0,04\pi$            | $0,07\pi$            | $0,09\pi$            | —                               | —                  | —                  | —                  |
| $v, \text{ м}$                        | $6 \cdot 10^{-6}$    | $3 \cdot 10^{-6}$    | $2 \cdot 10^{-6}$    | —                               | —                  | —                  | —                  |

Явление термоциклирования на микроконтактах позволяет более полно понять и оценить механизмы разрушения высокопрочных химико-термических покрытий на сталях.

В основе этих механизмов лежит усталостный износ. Однако природа износа объясняется не внешними факторами – удельным давлением и скоростью трения, а термическими. Это прогнозировали ранее и другие исследователи, отмечавшие, что на практике возможны случаи, когда только одни градиенты температур  $\Delta T$  вызывают такие повреждения в поверхностном слое, что трение осуществляется при пластическом контакте, хотя объемная температура невысока и удельные давления вызывают упругие деформации [2]. Подобные явления носят повсеместный характер, когда на поверхностях трения в областях фактического контакта возникает множество очагов термоциклирования именно на начальных этапах режима трения.

В конечном итоге это способствует трещинообразованию как по глубине поверхностного слоя за счет градиентов температур, так и в направлении вектора скорости трения за счет “бегущих” термических волн.

Работа представлена на Международной Интернет-конференции по металлургии и металлообработке, проведенной ТулГУ 1 - 30 июня 2011 г.

### Список литературы

1. Справочник по триботехнике: в 3 т. Т. 2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения / К.М. Бадыштова [и др.]. М.: Машиностроение, 1990. 411 с.
4. Чичинадзе А.В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении. М.: Наука, 1967. 231 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. школа, 1967. 599 с.
6. Гребер Г., Эрк С., Григуль У. Основы учения о теплообмене. М.: Изд-во иностр. лит., 1958. 566 с.

*P.I. Malenko*

#### *DEFINITION OF TEMPERATURE FIELDS AT FRICTION OF HIGH-STRENGTH CHEMICAL-THERMAL COVERINGS IN CONDITIONS OF RESOURCE GREASING*

*The questions of definition of temperature of flare  $T_{ecn}$  on individual microcontacts are considered at friction of sliding with a lubricant material. Is established, that the diagrams of change  $T_{ecn}$  carry character of high-frequency temperature fluctuations named as process heat cycling. The character of penetration of process heat cycling deep into of firm body is certain. The definition of concept "superficial temperature  $T_{nos}$ " as temperatures on the bottom part of a temperature superficial layer is offered.*

*Key words: temperature fields, process heat cycling, temperature of flare, superficial temperature.*

Получено 26.12.11