

## ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗОГРЕВА ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА ПЛАСТИН ПРИ ИХ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

*Колодежнов В.Н.*

*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж*

**Ключевые слова:** фрикционное взаимодействие, диссипативный разогрев.

**Аннотация.** Поведено математическое моделирование процесса диссипативного разогрева в системе двух фрикционно взаимодействующих пластин. На внешних поверхностях пластин ставятся граничные температурные условия третьего рода. На поверхности фрикционного взаимодействия кроме условия сопряжения температур ставится условие баланса тепловых потоков. Для случая установившегося процесса теплопереноса получены распределения температуры в пластинах. Получено условие, накладываемое на скорость движения пластин, при выполнении которого температура поверхности контакта достигает предельно допустимого значения.

## ESTIMATION OF THE HEATING TEMPERATURE OF THE CONTACT SURFACE OF THE PLATES DURING THEIR FRICTIONAL INTERACTION

*Kolodezhnov V.N.*

*Military Educational and Scientific Center of the Air Force «Air Force Academy named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh*

**Keywords:** frictional interaction, dissipative heating.

**Abstract.** A mathematical modeling of the dissipative heating process in a system of two frictionally interacting plates is carried out. Boundary temperature conditions of the third kind are set on the outer surfaces of the plates. On the surface of frictional interaction, in addition to the temperature conjugation condition, the condition of heat flow balance is set. For the case of a steady-state heat transfer process, temperature distributions in the plates were obtained. A condition is obtained that is imposed on the speed of movement of the plates, under which the temperature of the contact surface reaches the maximum permissible value.

Относительное движение отдельных звеньев механизмов при их контактировании с проскальзывания сопровождается трением. В свою очередь, поскольку работа сил трения трансформируется в тепловую энергию, это приводит к их нагреву. Такой эффект хорошо известен и постоянно проявляет себя в самых различных технологиях: обработка металлов резанием и шлифование [1, 2], волочение [3, 4], функционирование тормозных систем [5-7], процесс сварки трением [8, 9] и целый ряд других технических приложений [10].

Математическое моделирование диссипативного разогрева тел, обусловленного их фрикционным взаимодействием, основано на теории теплопереноса [11, 12].

Целью данной работы является моделирование процесса теплопереноса при фрикционном взаимодействии в системе двух пластин, совершающих относительное движение, и определение на основе такой модели оценки температуры максимального разогрева тел на поверхности их контакта.

Рассмотрим систему двух параллельных пластин толщиной  $h_1$  и  $h_2$ , контактирующих между собой на соответствующей поверхности. Будем полагать, что пластины внешними усилиями прижимаются друг к другу так, что нормальные напряжения на их общей границе принимают постоянное значение  $P$ . При этом вторая пластина остается неподвижной, а первая – движется прямолинейно и поступательно с постоянной скоростью  $V$ . Пусть коэффициент трения на поверхности взаимодействия пластин принимает постоянное и не зависящее от температуры значение  $f$ . Предполагая также, что эта поверхность фрикционного взаимодействия пластин выступает в качестве источника тепла, примем поверхностную плотность мощности тепловыделения такого источника равной [13]

$$q = f \cdot P \cdot V. \tag{1}$$

Это тепло, выделяемое с поверхности взаимодействия, отводится в пластины. При этом соотношение плотностей тепловых потоков, отводимых с поверхности фрикционного взаимодействия в каждую из пластин, естественно, не известно заранее.

Далее, на свободных поверхностях пластин происходит диссипация отводимого тепла в окружающую среду при заданных значениях коэффициентов теплообмена.

Введем систему координат, сориентировав ось  $Ox$  в плоскости контакта пластин вдоль вектора скорости. Ось  $Oy$  направим по нормали к поверхности контакта внутрь первой (движущейся) пластины.

Предполагая, что процесс теплопереноса является одномерным и установившимся, потребуем выполнения граничных температурных условий третьего рода на внешних поверхностях пластин. На поверхности их фрикционного взаимодействия, кроме условия сопряжения температуры, потребуем выполнения условия баланса тепловых потоков с учетом тепловыделения на этой поверхности с заданной интенсивностью (1).

Тогда в безразмерной форме записи эти условия могут быть представлены следующим образом

$$-\frac{dT'_1(y')}{dy'} \Big|_{y'=1} = Bi_1 \cdot T'_1(1); \tag{2}$$

$$T'_1(0) = T'_2(0); \left( -\frac{dT'_1(y')}{dy'} + \lambda'_2 \frac{dT'_2(y')}{dy'} \right) \Big|_{y'=0} = Ki; \tag{3}$$

$$h'_2 \cdot \frac{dT'_2(y')}{dy'} \Big|_{y'=-h'_2} = Bi_2 \cdot (T'_2(-h'_2) - T'_{S2}). \tag{4}$$

В граничных условиях (2)-(4) приняты обозначения

$$y' = \frac{y}{h_1}; T'_1(y') = \frac{T_1(y) - T_{S1}}{T_C - T_{S1}}; T'_2(y') = \frac{T_2(y) - T_{S1}}{T_C - T_{S1}}; T'_{S2}(y') = \frac{T_{S2} - T_{S1}}{T_C - T_{S1}};$$

$$h'_2 = \frac{h_2}{h_1}; \lambda'_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}; Bi_1 = \frac{\alpha_1 \cdot h_1}{\lambda_1}; Bi_2 = \frac{\alpha_2 \cdot h_2}{\lambda_2}; Ki = \frac{f \cdot P \cdot V \cdot h_1}{\lambda_1 \cdot (T_C - T_{S1})},$$

где  $T_1(y)$ ,  $T_2(y)$  – распределения температур в пластинах в зависимости от поперечной координаты  $y$ ;  $T_C$  – некоторая предельно допустимая температура разогрева поверхности фрикционного взаимодействия пластин (в частном случае температура фазового перехода для материала одной из пластин);  $T_{S1}$ ,  $T_{S2}$  – температуры окружающего пространства на свободных поверхностях пластин;  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – коэффициенты теплопроводности для материалов пластин;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи на свободных поверхностях пластин;  $Bi_1$ ,  $Bi_2$ ,  $Ki$  – критерии подобия Био и Кирпичева, соответственно [14].

Здесь и далее верхними штрихами отмечены безразмерные величины и функции, а нижние цифровые индексы 1 и 2 относят параметры задачи, соответственно, к первой (движущейся) и второй (неподвижной) пластинам, соответственно.

Решая теперь классические уравнения теплопереноса [11, 12] с граничными условиями (2)-(4), определяем распределения температуры в пластинах для установившегося режима теплопереноса. В рассматриваемом случае зависимость температур от поперечной координаты будет иметь линейный характер. При этом, как и следовало ожидать, максимальное значение температуры будет достигаться на поверхности фрикционного взаимодействия.

Анализируя полученное решение, приходим к следующему условию

$$Ki \geq \frac{Bi_1}{(1 + Bi_1)} + \frac{\lambda'_2 \cdot Bi_2 \cdot (1 - T'_{S2})}{h'_2 \cdot (1 + Bi_2)}, \quad (5)$$

накладываемому, по сути, на скорость относительного движения пластин, коэффициент трения и нормальное давление на поверхности контакта посредством ограничения на значение безразмерного критерия подобия  $Ki$ . При выполнении этого условия максимальная температура разогрева пластин на поверхности фрикционного взаимодействия достигает или превышает предельно допустимую температуру  $T_C$ .

Условие (5), полученное из решения задачи об установившемся теплопереносе в системе двух фрикционно взаимодействующих пластин, позволяет сформировать область соответствующих значений исходных параметров системы, которые обеспечивают допустимую технологией процесса температуру диссипативного разогрева в наиболее нагруженной (с точки зрения разогрева) зоне.

### Список литературы

1. Резников А.Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.
2. Попок Н.Н. Теория резания: В 2 ч. Ч. 2. Тепловые явления, изнашивание режущего инструмента, качество обрабатываемой поверхности, комбинированные виды обработки, оптимизация функционирования системы резания. – Новополюк: ПГУ, 2005. – 166 с.
3. Рудской А.И., Лунев В.А., Шаболдо О.П. Волочение. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 126 с.
4. Верещагин М.Н., Бобарикин Ю.Л., Савенюк А.Н., Веденев А.В., Целуев М.Ю., Игнатенко О.И. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние в проволоке из высокоуглеродистой стали // Литье и металлургия. – 2008. – №1(45). – С. 40-48.

5. Иноземцев В.Г. Тепловые расчеты при проектировании и эксплуатации тормозов. – М.: Транспорт, 1966. – 40 с.
6. Галай Э.И., Рудов П.К., Галай Е.Э. Тепловой расчет фрикционных узлов тормоза грузовых вагонов // *Механика. Исследования и инновации.* – 2018. – Вып. 11. – С. 31-40.
7. Хоньшев Н.В., Лавренченко А.А., Прохоров А.В., Коновалов Д.Н. Методика теплового расчета автомобильных дисковых тормозных механизмов // *Транспорт. Вестник гражданских инженеров.* – 2020. – №4(81). – С. 203-207.
8. Масленников А.В., Ерофеев В.А. Физико-математическая модель фрикционной сварки перемешиванием // *Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки.* – 2008. – № 10. – С. 64-73.
9. Рзаев Р.А., Джалмухамбетов А.У., Смирнов В.В., Атуев Ш.М. Динамика температурного поля и оценка технологических параметров при сварке трением с перемешиванием биметаллических пластин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2016. – Т. 18, № 1(2). – С. 274-278.
10. Амосов А.П. Разогрев и воспламенение твердых ВВ при сухом трении с износом // *Физика горения и взрыва.* – 1980. – № 3. – С. 12-19.
11. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
12. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
13. Амосов А.П. Элементарные теплофизические модели трения // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2011. – Т. 13, № 4(3). – С. 656-662.
14. Колодежнов В.Н. Безразмерные комплексы и критерии подобия в гидроаэромеханике: Справочник. – Воронеж: Воронежский госпедуниверситет, 2011. – 580 с.

Сведения об авторе:

*Колодежнов Владимир Николаевич* – д.т.н., профессор, профессор кафедры общепрофессиональных дисциплин.