

УДК 536.2

## НЕЛИНЕЙНАЯ АСИММЕТРИЯ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ДВУХСЛОЙНОЙ СИСТЕМЕ

Д.Г. КРОЛЬ

(Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого)

*Рассматривается асимметрия теплопереноса в двухслойной металлической пластине при импульсном поверхностном воздействии на границу образца. Асимметрия появляется при перестановке слоев металлов. Представлены количественные и качественные результаты исследования систем Fe – W и W – V. Исследуются основные факторы влияния на асимметрию теплопереноса: влияние условий импульсного нагрева; влияние начальной температуры образца; нелинейных свойств коэффициента теплопроводности на параметры асимметрии процесса; установление количественных и качественных характеристик гистерезисных процессов в зоне контакта слоев. Асимметрия на правой границе теплоизолированного образца практически отсутствует. Гистерезисные процессы в зоне контакта наиболее четко выражены при перестановке металлических слоев.*

### Введение

Явление асимметрии теплового потока изучалось экспериментально в стационарных условиях на двухслойных пластинах [1]. Теоретическое изучение асимметрии в нестационарных условиях проведено в работах [2, 3]. Были получены следующие результаты:

- 1) тепловое взаимодействие металлов существенным образом зависит от знаков производных  $d\lambda/dT$  в каждом слое;
- 2) отношение толщин слоев  $h_2/h_1$  принципиальным образом влияет на асимметрию процесса;
- 3) производство энтропии и динамический тепловой гистерезис в зоне контакта наиболее чувствительно реагируют на перестановку слоев металлов и на изменение начальной температуры системы.

Данная работа является продолжением этих исследований и развивает их по следующим направлениям:

- 1) влияние условий импульсного нагрева;
- 2) влияние начальной температуры образца;
- 3) влияние нелинейных свойств коэффициента теплопроводности на параметры асимметрии процесса;
- 4) установление количественных и качественных характеристик гистерезисных процессов в зоне контакта слоев. Отличительная черта представленных здесь задач – теплоизолированная правая граница образца.

### Постановка и решение задачи

Уравнение энергии и закон Фурье для теплового потока имеют вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \quad q = -\frac{\partial \Lambda}{\partial x}, \quad t \geq 0; \quad (1)$$

$$u(T) = \int_0^T c(T) dT, \quad \Lambda(T) = \int_0^T \lambda(T) dT,$$

где  $x$  – декартова координата;  $t$  – время;  $T$  – температура;  $q$  – удельный тепловой поток;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $c$  – объемная теплоемкость.

Искомые функциями являются температура и тепловой поток в двух контактирующих областях:

- первый слой:  $T = T^{(1)}(x, t)$ ;  $q = q^{(1)}(x, t)$ ,  $x \in [0, h_1]$ ;

- второй слой:  $T = T^{(2)}(x, t)$ ;  $q = q^{(2)}(x, t)$ ,  $x \in [h_1, h]$ .

Толщина образца равна  $h = h_1 + h_2$ .

Условия идеального теплового контакта:

$$x = h_1, \quad T^{(1)} = T^{(2)}, \quad q^{(1)} = q^{(2)}. \quad (2)$$

Правая граница области теплоизолирована:

$$x = h, \quad q^{(2)}(h, t) = 0. \quad (3)$$

Помимо теоретического значения, условие теплоизоляции важно еще и потому, что его нетрудно осуществить на практике.

Тепловой поток  $q_0(t)$  характеризует поверхностный источник энергии на левой границе:

$$x = 0, \quad q^{(1)}(0, t) = q_0(t). \quad (4)$$

Начальная температура образца однородная по координате:

$$t = 0, \quad T(x, 0) = T^0 \equiv \text{const}, \quad (5)$$

причем  $T_w = T^0$ .

Теплофизические свойства металлов аппроксимируются полиномами третьей степени с постоянными коэффициентами:

$$c = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3; \quad \lambda = \lambda_0 + \lambda_1 T + \lambda_2 T^2 + \lambda_3 T^3, \quad T \in [T', T'']. \quad (6)$$

Процесс нагрева рассматривается в интервалах температур, для которых фазовые превращения не происходят. Построение аппроксимирующих полиномов выполняется на основе справочных данных [4]. Производство энтропии подсчитываем по формуле [5]:

$$y = q \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{T} \right).$$

Изучаем важный на практике случай, когда нагрев осуществляется импульсом треугольной временной формы:

$$q_0(t) = B t^n \exp(mt); \quad B > 0, \quad n > 0, \quad m < 0; \quad B, n, m - \text{const}.$$

Характеристики этого импульса такие:

- максимальное значение поверхностного теплового потока:

$$t = t_0, \quad q_{\max} = q_0(t_0);$$

- длительность импульса:

$$t = t_1, \quad q_0(t_1) = 0,001 q_{\max}.$$

Численные расчеты проводятся в безразмерных величинах. При обезразмеривании применяются масштабы величин (они отмечены нижним индексом  $b$ ), обеспечивающие инвариантность размерной и безразмерной форм записи:  $\lambda_b = x_b^2 c_b / t_b$ ,  $q_b = \lambda_b T_b / x_b$ ;  $\lambda_b = x_b^2 c_b / t_b$ ,  $q_b = \lambda_b T_b / x_b$  и т.д.

Решение краевой задачи (1) – (6) выполняется численным методом интегральных соотношений А.А. Дородницына. Алгоритм построения расчетной схемы подробно изложен в [6].

### Результаты и обсуждение

При обработке результатов расчетов применяем следующие критерии:

- безразмерный градиент температуры:

$$g = \frac{h}{T^0} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right);$$

- безразмерный тепловой поток:

$$Q = \frac{q(x, t) h}{T^0 \lambda(T^0)};$$

- безразмерное производство энтропии:

$$S = \frac{y(x, t)}{y^0}, \quad y^0 = \lambda(T^0) / h^2.$$

Параметры асимметрии (ПА), характеризующие тепловые свойства двухслойной пластины, такие [2, 3]:

- ПА температуры на левой границе:

$$A_T^{(0)} = \frac{(T_0)_{M_1-M_2}^{\max}}{(T_0)_{M_2-M_1}^{\max}};$$

- ПА температуры в зоне контакта:

$$A_T^{(z)} = \frac{(T_z)_{M_1-M_2}^{\max}}{(T_z)_{M_2-M_1}^{\max}};$$

- ПА теплового потока в зоне контакта;

$$A_q^{(z)} = \frac{(q_z)_{M_1-M_2}^{\max}}{(q_z)_{M_2-M_1}^{\max}};$$

- ПА температуры на правой изотермической границе  $x_w = h$  :

$$A_T^{(w)} = \frac{(T_w)_{M_1-M_2}^{\max}}{(T_w)_{M_2-M_1}^{\max}};$$

- ПА производства энтропии в зоне контакта:

$$A_\sigma^{(z)} = \frac{F_{M_1-M_2}^{(g,S)}}{F_{M_2-M_1}^{(g,S)}};$$

- ПА динамического теплового гистерезиса (ДТГ) в зоне контакта:

$$A_G^{(z)} = \frac{F_{M_1-M_2}^{(g,Q)}}{F_{M_2-M_1}^{(g,Q)}}.$$

Индексом  $z$  отмечены значения функций при  $x = h_1$ . В качестве  $M_1, M_2$  применяем химические символы металлов; расположение индексов  $M_1 - M_2$  и  $M_2 - M_1$  указывает на расположение металлических слоев до и после перестановки. Полагаем, что поверхностный источник энергии всегда действует на левую границу образца. Буквами  $F_{M_1-M_2}^{(g,S)}$ ,  $F_{M_1-M_2}^{(g,Q)}$  и т.д. обозначаем площади петель ДТГ в плоскостях «градиент температуры – производство энтропии» и «градиент температуры – тепловой поток». При вычислении  $A_T^{(0)}$ ,  $A_T^{(z)}$ ,  $A_q^{(z)}$ ,  $A_T^{(w)}$  применяем максимальные достигаемые в данном процессе значения функций  $T_0 = T(0, t)$ ,  $T_z = T(h_1, t)$ ,  $q_z = q(h_1, t)$ ,  $T_w = T(h, t)$ ,  $t \in [0, t_1]$ . Энтропийные и гистерезисные свойства локально-неравновесного теплопереноса изучены в [7]. Асимметричные свойства теплопереноса выражены тем сильнее, чем больше ПА отличается от единицы.

Опыт изучения явления тепловой асимметрии [2, 3] показал важную роль нелинейных свойств коэффициента теплопроводности  $\lambda(T)$ . Здесь мы рассматриваем два класса нелинейных процессов:

- 1) в каждом слое  $d\lambda/dT < 0$ ; в качестве примера берем железо и молибден;
- 2) в одном слое  $d\lambda/dT < 0$ , а в другом  $d\lambda/dT > 0$ ; в качестве примера берем железо и ванадий.

Построение аппроксимирующих полиномов вида (8) было выполнено в следующих температурных интервалах: Fe – [300, 1040]; Mo – [300, 2600]; V – [300, 2000] (значения температуры указаны в кельвинах). При вычислении  $Q, S$  берем  $\lambda(T^0) = \lambda_{Fe}(T^0)$ .

Для всех рассмотренных вариантов  $h = 1 \cdot 10^{-2}$  м;  $T_b = 100$  К,  $\lambda_b = 100$  Вт/(м·К),  $q_b = 1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Параметр поверхностного источника**

В качестве параметра поверхностного источника было выбрано время достижения  $t_0$  максимального теплового потока  $q_{\max}$  при  $h_1 = h_2$  (табл. 1).

Таблица 1

Влияние  $t_0$  на параметры асимметрии

| № | $t_0, c$ | Система Fe – V |             |             |             |                  | Система W – V |             |             |             |             |                  |             |
|---|----------|----------------|-------------|-------------|-------------|------------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------|
|   |          | $A_T^{(0)}$    | $A_T^{(z)}$ | $A_q^{(z)}$ | $A_T^{(w)}$ | $A_\sigma^{(z)}$ | $A_G^{(z)}$   | $A_T^{(0)}$ | $A_T^{(z)}$ | $A_q^{(z)}$ | $A_T^{(w)}$ | $A_\sigma^{(z)}$ | $A_G^{(z)}$ |
| 1 | 0,10     | 1,186          | 0,923       | 0,434       | 1,000       | 0,070            | 0,091         | 0,709       | 1,169       | 1,916       | 1,000       | 5,462            | 6,417       |
| 2 | 0,15     | 1,195          | 0,920       | 0,456       | 1,000       | 0,081            | 0,134         | 0,723       | 1,168       | 1,699       | 1,000       | 3,884            | 4,600       |
| 3 | 0,20     | 1,197          | 0,920       | 0,471       | 1,000       | 0,095            | 0,146         | 0,731       | 1,162       | 1,563       | 1,000       | 2,857            | 3,490       |
| 4 | 0,25     | 1,197          | 0,923       | 0,482       | 1,000       | 0,103            | 0,170         | 0,738       | 1,154       | 1,472       | 1,000       | 2,304            | 2,893       |
| 5 | 0,30     | 1,195          | 0,926       | 0,490       | 1,000       | 0,111            | 0,178         | 0,744       | 1,143       | 1,409       | 1,000       | 1,960            | 2,510       |
| 6 | 0,35     | 1,193          | 0,930       | 0,496       | 1,000       | 0,122            | 0,193         | 0,750       | 1,133       | 1,363       | 1,000       | 1,734            | 2,242       |
| 7 | 0,40     | 1,191          | 0,934       | 0,502       | 1,000       | 0,128            | 0,191         | 0,755       | 1,123       | 1,328       | 1,000       | 1,572            | 2,198       |
| 8 | 0,45     | 1,188          | 0,938       | 0,506       | 0,999       | 0,134            | 0,207         | 0,761       | 1,113       | 1,302       | 1,000       | 1,453            | 1,932       |
| 9 | 0,50     | 1,168          | 0,947       | 0,527       | 0,999       | 0,152            | 0,229         | 0,766       | 1,104       | 1,282       | 1,000       | 1,365            | 1,820       |

Здесь  $T_w = 300\text{K}$ , расчеты показывают, что  $(T_0)_{\text{Fe-W}}^{\text{max}} \cong 1000\text{K}$ ,  $(T_0)_{\text{V-W}}^{\text{max}} \cong 2000\text{K}$ .

Асимметрия температуры для обоих классов процессов полностью отсутствует на правой границе:  $A_T^{(w)} = 1$ .

С увеличением  $t_0$  наблюдаем следующие явления:

1) для системы Fe – W –  $A_T^{(z)} \cong 0,93$ ,  $A_T^{(0)} \cong 1,191$ . В количественном отношении асимметрия наиболее выразительно проявляется в гистерезисном процессе – параметры  $A_y^{(z)}$ ,  $A_G^{(z)}$  значительно меньше 1, причем параметр асимметрии производства энтропии и параметр асимметрии динамического теплового гистерезиса монотонно возрастают;

2) для системы W – V –  $A_T^{(z)} \cong 1,143$ ,  $A_T^{(0)} \cong 0,744$ . Параметр  $A_q^{(z)}$  монотонно убывает. Асимметрия гистерезисных процессов ослабевает (см.  $A_y^{(z)}$  и  $A_G^{(z)}$ ), приближается к 1 со стороны больших значений.

### Начальная температура образца

Важным физическим свойством процесса является начальная температура образца. Таблица 2 составлена при  $t_0 = 0,3\text{c}$ ,  $t_1 = 1,245\text{c}$ ,  $h_1 = h_2$ .

Таблица 2

Влияние начальной температуры образца на параметры асимметрии

| № | $T^0, \text{K}$ | Система Fe – V |             |             |             |             |             | Система W – V |             |             |             |             |             |
|---|-----------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   |                 | $A_T^{(0)}$    | $A_T^{(z)}$ | $A_q^{(z)}$ | $A_T^{(w)}$ | $A_G^{(z)}$ | $A_G^{(z)}$ | $A_T^{(0)}$   | $A_T^{(z)}$ | $A_q^{(z)}$ | $A_T^{(w)}$ | $A_G^{(z)}$ | $A_G^{(z)}$ |
| 1 | 300             | 1,197          | 0,926       | 0,489       | 0,999       | 0,111       | 0,168       | 0,739         | 1,139       | 1,392       | 0,997       | 1,903       | 2,417       |
| 2 | 325             | 1,188          | 0,927       | 0,483       | 0,999       | 0,104       | 0,165       | 0,745         | 1,134       | 1,396       | 0,997       | 1,987       | 2,438       |
| 3 | 350             | 1,179          | 0,929       | 0,477       | 1,000       | 0,096       | 0,161       | 0,751         | 1,129       | 1,399       | 0,997       | 2,066       | 2,453       |
| 4 | 375             | 1,171          | 0,931       | 0,471       | 1,000       | 0,089       | 0,148       | 0,756         | 1,124       | 1,403       | 0,998       | 2,143       | 2,458       |
| 5 | 400             | 1,163          | 0,934       | 0,466       | 1,000       | 0,084       | 0,145       | 0,762         | 1,119       | 1,406       | 0,998       | 2,223       | 2,464       |
| 6 | 425             | 1,155          | 0,936       | 0,460       | 1,000       | 0,079       | 0,130       | 0,768         | 1,115       | 1,410       | 0,998       | 2,296       | 2,500       |
| 7 | 450             | 1,147          | 0,938       | 0,455       | 1,000       | 0,074       | 0,147       | 0,773         | 1,111       | 1,413       | 0,998       | 2,373       | 2,518       |
| 8 | 475             | 1,140          | 0,941       | 0,448       | 1,000       | 0,070       | 0,144       | 0,778         | 1,106       | 1,417       | 0,998       | 2,447       | 2,538       |
| 9 | 500             | 1,132          | 0,943       | 0,442       | 1,000       | 0,066       | 0,132       | 0,784         | 1,102       | 1,421       | 0,998       | 2,513       | 2,535       |

На правой границе асимметрия температуры по-прежнему практически отсутствует. По мере роста  $T^0$  наблюдаем:

1) ослабление асимметричных свойств температуры на левой границе (см.  $A_T^{(0)}$ ) и на границе слоев (см.  $A_T^{(z)}$ );

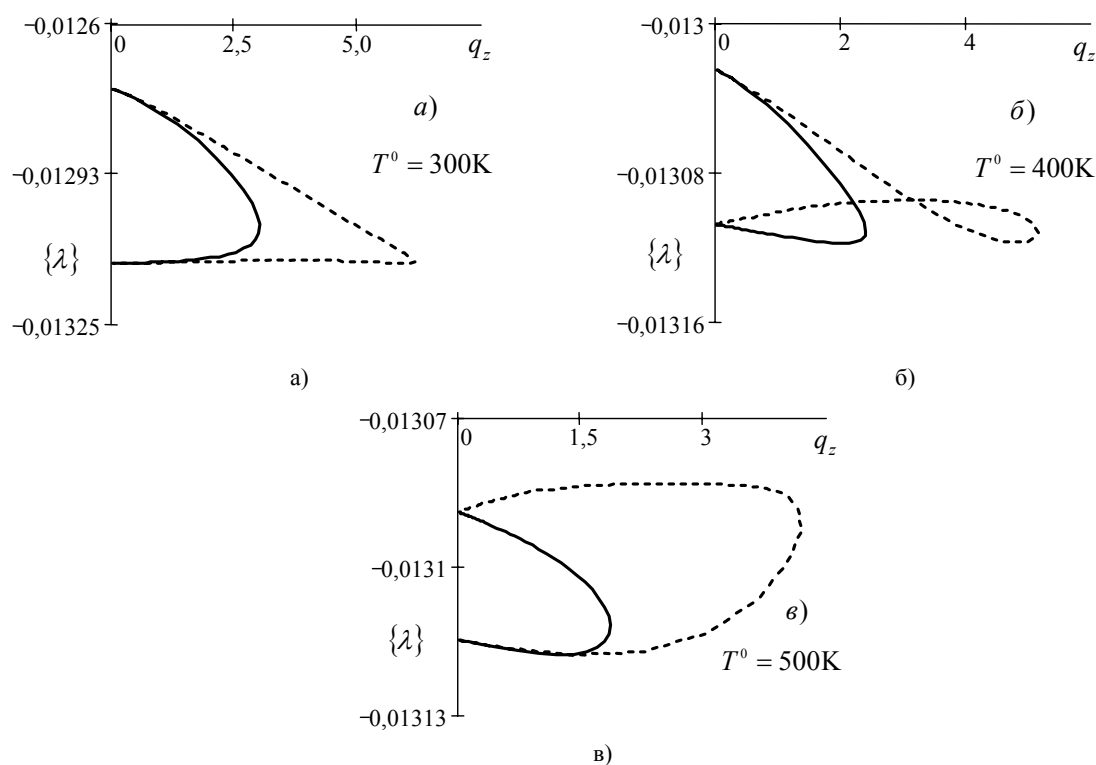
2) усиление асимметрии гистерезисных свойств:  $A_y^{(z)}$  и  $A_G^{(z)}$  убывают примерно такими же темпами, какими нарастает  $T^0$ ;

3) параметр асимметрии теплового потока на границе слоев монотонно убывает. Рассмотрим скачки теплопроводности  $\{\lambda\}$  в зоне контакта для системы Fe – W:

$$\{\lambda\}_{M_1-M_2} = \frac{1}{\lambda_{\text{Fe}}^0} [\lambda_{M_1}(T) - \lambda_{M_2}(T)] \quad \text{при} \quad T = (T_z)_{M_1-M_2}; \quad (7)$$

$$\{\lambda\}_{M_2-M_1} = \frac{1}{\lambda_{\text{Fe}}^0} [\lambda_{M_2}(T) - \lambda_{M_1}(T)] \quad \text{при} \quad T = (T_z)_{M_2-M_1}.$$

Здесь  $\lambda_{\text{Fe}}^0$  подсчитывается при  $T = 300\text{K}$ . Своеобразие ситуации в том, что функции (7) могут немонотонно зависеть от температуры, и тогда появляется самопересечение линии, характеризующей зависимость  $\{\lambda\}$  от  $q_z$  (рисунок, б). Если функции – монотонные, то самопересечений нет (рисунок, а, в).



Влияние начальной температуры образца на скачок теплопроводности в зоне контакта:  
сплошная линия –  $\{\lambda\}_{\text{Fe-w}}$ ; штриховая –  $\{\lambda\}_{\text{W-Fe}}$

**Перестановка металлов при фиксированных толщинах слоев**

Содержащиеся здесь результаты относятся к варьированию металлов, заполняющих слой; в каждом варианте расчёта толщины  $h_1, h_2$  фиксированные (табл. 3).

Таблица 3

Влияние перестановки металлов на параметры асимметрии при фиксированных в каждом варианте толщинах слоев

| № | $h_2 / h_1$ | Система Fe – W |             |             |             |                  |             | Система W – V |             |             |             |                  |             |
|---|-------------|----------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------|
|   |             | $A_T^{(0)}$    | $A_T^{(z)}$ | $A_q^{(z)}$ | $A_T^{(w)}$ | $A_\sigma^{(z)}$ | $A_G^{(z)}$ | $A_T^{(0)}$   | $A_T^{(z)}$ | $A_q^{(z)}$ | $A_T^{(w)}$ | $A_\sigma^{(z)}$ | $A_G^{(z)}$ |
| 1 | 9,000       | 1,038          | 0,866       | 0,829       | 1,165       | 0,585            | 0,550       | 1,031         | 1,266       | 1,019       | 0,889       | 0,432            | 0,636       |
| 2 | 4,000       | 1,124          | 0,838       | 0,711       | 1,107       | 0,365            | 0,350       | 0,873         | 1,320       | 1,023       | 0,929       | 0,569            | 0,900       |
| 3 | 2,333       | 1,168          | 0,831       | 0,639       | 1,069       | 0,256            | 0,287       | 0,798         | 1,376       | 1,073       | 0,956       | 0,800            | 1,510       |
| 4 | 1,500       | 1,185          | 0,880       | 0,561       | 1,032       | 0,169            | 0,241       | 0,764         | 1,251       | 1,218       | 0,979       | 1,230            | 1,844       |
| 5 | 1,000       | 1,198          | 0,925       | 0,487       | 1,000       | 0,110            | 0,167       | 0,740         | 1,143       | 1,414       | 1,000       | 2,011            | 2,523       |
| 6 | 0,667       | 1,197          | 0,951       | 0,414       | 0,967       | 0,069            | 0,128       | 0,727         | 1,063       | 1,704       | 1,022       | 3,517            | 3,571       |
| 7 | 0,429       | 1,193          | 0,935       | 0,346       | 0,935       | 0,039            | 0,088       | 0,718         | 1,045       | 2,128       | 1,045       | 6,962            | 5,739       |
| 8 | 0,250       | 1,195          | 0,903       | 0,286       | 0,903       | 0,020            | 0,061       | 0,713         | 1,070       | 2,696       | 1,070       | 15,08            | 9,428       |
| 9 | 0,111       | 1,190          | 0,871       | 0,236       | 0,871       | 0,011            | 0,035       | 0,706         | 1,094       | 3,238       | 1,094       | 32,62            | 14,02       |

Здесь  $t_0 = 0,3\text{ с}$ ,  $t_1 = 1,245\text{ с}$ . Для пары металлов Fe – W максимальный тепловой поток составил  $q_{\text{max}} = 1,926 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ ; для W – V  $q_{\text{max}} = 3,832 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^2$ . В зоне контакта отчетливо выражена асимметрия теплового потока. Асимметрия температуры на правой границе выражена незначительно (см.  $A_T^{(w)}$ ). Зависимость  $A_T^{(z)}$  от  $h_2 / h_1$  немонотонная, имеет максимум. По мере роста толщины второго слоя наблюдаем следующие явления: асимметрия производства энтропии (см.  $A_y^{(z)}$ ) и асимметрия ДТГ (см.  $A_G^{(z)}$ ) увеличиваются.

### Перестановка металлических слоев

Обсудим результаты расчета при перестановке толщин слоев вместе с наполняющими их металлами (табл. 4). Параметры  $q_{\max}$ ,  $t_0$ ,  $t_1$  такие же, как и в таблице 3. Видим, что при перестановке слоев металлов появляются своеобразные черты процесса – существует значение  $(h_2/h_1)_*$ , для которого  $A_T^{(z)}$  и  $A_q^{(z)}$  близки к 1, при отклонении отношения толщин слоев в обе стороны от  $(h_2/h_1)_*$  появляется хорошо выраженная асимметрия температуры и теплового потока в зоне контакта; на правой границе  $x=h$  асимметрия температуры практически отсутствует; параметры асимметрии гистерезисных процессов меняются в очень широком числовом диапазоне (см.  $A_y^{(z)}$ ,  $A_G^{(z)}$ ). В системе Fe – W параметр асимметрии температуры на левой границе  $A_T^{(0)}$  как функция  $h_2/h_1$  имеет максимум, а в системе W – V – минимум.

Таблица 4

Влияние перестановки металлических слоев разной толщины на параметры асимметрии

| № | $h_2/h_1$ | Система Fe – W |             |             |             |             |             | Система W – V |             |             |             |             |             |
|---|-----------|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|   |           | $A_T^{(0)}$    | $A_T^{(z)}$ | $A_q^{(z)}$ | $A_T^{(w)}$ | $A_G^{(z)}$ | $A_G^{(z)}$ | $A_T^{(0)}$   | $A_T^{(z)}$ | $A_q^{(z)}$ | $A_T^{(w)}$ | $A_G^{(z)}$ | $A_G^{(z)}$ |
| 1 | 9,000     | 1,162          | 1,287       | 7,129       | 1,102       | 412,95      | 98,375      | 0,894         | 2,039       | 35,65       | 1,112       | 11469       | 1902,4      |
| 2 | 4,000     | 1,197          | 1,114       | 2,656       | 1,041       | 20,990      | 10,436      | 0,837         | 1,709       | 11,70       | 1,054       | 559,9       | 222,60      |
| 3 | 2,333     | 1,204          | 1,010       | 1,410       | 1,002       | 2,9789      | 2,1481      | 0,787         | 1,464       | 5,125       | 1,003       | 65,55       | 47,217      |
| 4 | 1,500     | 1,203          | 0,985       | 0,818       | 1,002       | 0,5579      | 0,6275      | 0,758         | 1,282       | 2,610       | 1,003       | 10,56       | 10,339      |
| 5 | 1,000     | 1,198          | 0,925       | 0,487       | 1,000       | 0,1100      | 0,1672      | 0,740         | 1,143       | 1,414       | 1,000       | 2,011       | 2,523       |
| 6 | 0,667     | 1,179          | 0,850       | 0,285       | 0,997       | 0,0209      | 0,0494      | 0,732         | 1,038       | 0,795       | 0,997       | 0,410       | 0,637       |
| 7 | 0,429     | 1,157          | 0,769       | 0,157       | 0,997       | 0,0034      | 0,0118      | 0,729         | 0,982       | 0,445       | 0,985       | 0,085       | 0,184       |
| 8 | 0,250     | 1,122          | 0,679       | 0,077       | 0,960       | 0,0004      | 0,0020      | 0,743         | 0,826       | 0,236       | 0,943       | 0,015       | 0,038       |
| 9 | 0,111     | 1,064          | 0,586       | 0,027       | 0,931       | 0,0001      | 0,0002      | 0,814         | 0,679       | 0,093       | 0,876       | 0,001       | 0,005       |

### Выводы

Основные факторы влияния на асимметрию теплопереноса:

- температурная зависимость коэффициента теплопроводности  $\lambda(T)$ , т.е. знаки производных  $(d\lambda/dT)_{M_1}$ ,  $(d\lambda/dT)_{M_2}$ ;

- начальная температура образца  $T^0$ ;

- отношение толщин слоев  $h_1/h_2$ ;

- время достижения  $t_0$  максимального теплового потока  $q_{\max}$ .

Асимметрия на правой границе теплоизолированного образца практически отсутствует. Гистерезисные процессы в зоне контакта наиболее четко выражены при перестановке металлических слоев.

Работа выполнена под научным руководством профессора О.Н. Шабловского.

### ЛИТЕРАТУРА

- Gogol, W. Experimental investigations of effect of asymmetry of heat conduction in two-component systems Eksperymentaln badania efektu asymetrii przewodzenia w ukladach dwuskładnikowych / W. Gogol // Archiwum termodynamiki. – 1984. – Vol. 5. – № 3 – 4. – P. 289 – 311.
- Шабловский, О.Н. Динамические свойства контактного теплообмена в двухслойной металлической пластине / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Материалы, технологии, инструменты. – 2004. – Т. 9. – № 4. – С. 9 – 14.
- Шабловский, О.Н. Асимметричные свойства тепловых процессов при поверхностном нагреве двухслойной металлической пластины / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Прикладная физика. – 2005. – № 1. – С. 31 – 38.
- Зиновьев, В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах / В.Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
- Беккер, Р. Теория теплоты / Р. Беккер. – М.: Энергия, 1974. – 504 с.
- Шабловский, О.Н. Численное решение задач нестационарного нагрева металлов / О.Н. Шабловский, Д.Г. Кроль // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения: Сб. науч. тр. Ин-та математики НАН Украины. – Киев, 1998. – С. 234 – 237.
- Шабловский, О.Н. Релаксационный теплоперенос в нелинейных средах / О.Н. Шабловский. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2003. – 382 с.

Поступила 26.02.2007