УДК 662.289:678.063

***А.А. Аваев***
*Череповецкий государственный университет*

## ТЕПЛОПЕРЕНОС В ХОДЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРА В СИММЕТРИЧНОЙ СИСТЕМЕ ЭЛАСТОМЕР-МЕТАЛЛ-ЭЛАСТОМЕР

Данная математическая модель представляет собой попытку описания нестационарного теплопереноса в процессе контактной термической вулканизации эластомера в системе эластомер-металл-эластомер. Описание такого процесса весьма затруднительно. Это связано с протеканием физико-химических процессов и изменением теплофизических свойств эластомера в ходе его вулканизации. В случае, когда содержание свободной серы в эластомере относительно невелико, моделирование процесса теплопереноса заметно упрощается. Предлагаемая математическая модель основана на решении системы линейных уравнений теплопроводности. Эта модель может быть использована в современной инженерной практике.

Система эластомер-металл-эластомер, математическое моделирование, контактная термическая вулканизация, свободная сера, слой эластомера, система линейных уравнений теплопроводности, преобразование Лапласа.

В современной промышленности достаточно широко применяют элементы конструкций, представляющие собой стальные пластины с нанесенными слоями эластомера на обеих поверхностях. Покрытия из эластомера используются с целью защиты стали от механического или коррозионного воздействия внешней среды и позволяют применять в конструкторских разработках наиболее экономичные марки стали.

После нанесения на стальную пластину слоев эластомера их подвергают термической вулканизации, которая представляет собой сложный физико-химический процесс, в первой фазе которого происходит плавление свободной серы, сопровождающееся поглощением тепла, после чего происходит вторая фаза – связывание свободной серы, сопровождающееся тепловыделением [1].

В подобных ситуациях математическое моделирование нестационарной теплопроводности в системе эластомер-металл-эластомер приобретает решающее значение. Дело в том, что непосредственный контроль хода теплового процесса весьма затруднителен и приводит к большим погрешностям в измерении температуры в различных точках стали и, в особенности, слоев эластомера.

В эластомере с малым содержанием свободной серы можно пренебречь эффектами поглощения и выделения тепла. Кроме того, изменение теплофизических свойств эластомера в подобных случаях является весьма малым [2], что позволяет при описании нестационарной теплопроводности в ходе вулканизации слоев эластомера считать эти свойства постоянными.

Если оба слоя эластомера одинаковы по толщине и составу ингредиентов, то система эластомер-металл-эластомер становится симметричной, что позволяет дополнительно упростить модель нестационарной теплопроводности такой системы.

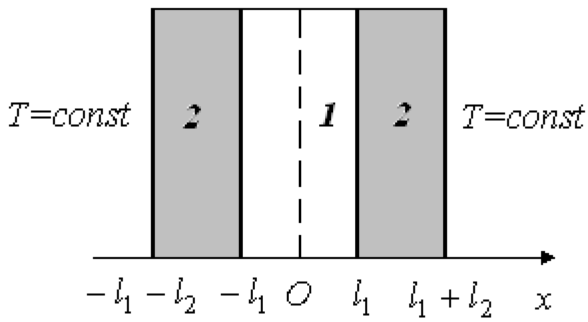


*Рис. 1. Схема симметричной системы эластомер-металл-эластомер*

На рисунке 1 представлена принципиальная схема рассматриваемой системы. На обе поверхности бесконечной стальной пластины толщины $2l_1$ нанесены покрытия из эластомера, толщина каждого из которых составляет $l_2$ (на рисунке слои эластомера выделены серым цветом). Плоскость симметрии (на рисунке она представлена пунктирной линией) описывается уравнением $x=0$. Стали соответствует номер 1, эластомеру – номер 2.

Если бы система не являлась симметричной, то для моделирования процесса внутреннего переноса тепла потребовалось решать систему из трех уравнений теплопроводности. В предлагаемой модели система сводится к двум уравнениям – для стали (1) и слоя эластомера (2):

$$\frac{\partial t_1(x,\tau)}{\partial \tau}=a_1\frac{\partial^2 t_1(x,\tau)}{\partial x^2}; \qquad (1)$$

$$(0<\tau<+\infty;\ 0<x\le l_1)$$

$$\frac{\partial t_2(x,\tau)}{\partial \tau}=a_2\frac{\partial^2 t_2(x,\tau)}{\partial x^2}, \qquad (2)$$

$$\left(0<\tau<+\infty;\, l_1<x<l_1+l_2\right),$$

где $t_i\left(x,\tau\right)$ – температура ($^oC$) слоя системы с номером $i$ в точке с координатой $x$ в момент времени $\tau, c$ ; $a_i$ – коэффициент температуропроводности соответствующего материала, $м^2/с$ $\left(i=1;2\right)$.

При решении системы уравнений (1)–(2) предлагается использовать краевые условия:

$$t_1\left(x,0\right)=t_2\left(x,0\right)=t_0=const; \tag{3}$$

$$\frac{\partial t_1\left(0,\tau\right)}{\partial x}=0; \tag{4}$$

$$t_1\left(l_1,\tau\right)=t_2\left(l_2,\tau\right); \tag{5}$$

$$\lambda_1\frac{\partial t_1\left(l_1,\tau\right)}{\partial x}=\lambda_2\frac{\partial t_2\left(l_1,\tau\right)}{\partial x}; \tag{6}$$

$$t_2\left(l_1+l_2\right)=T=const; \tag{7}$$

где $\lambda_i$ – коэффициент теплопроводности, $Вт/\left(м\cdot{}^oC\right)$; $T$ – температура на поверхностях $x=-l_1-l_2$ и $x=l_1+l_2$ системы, $^oC$.

Начальное условие (3) соответствует постоянному значению температуры во всех точках обеих пластин в момент времени $\tau=0$.

Граничное условие (4) отвечает условию симметрии системы, т.е. отсутствию теплообмена через плоскость $x=0$.

Граничные условия (5)–(6) соответствуют так называемому идеальному тепловому контакту стали и эластомера, когда на поверхностях $x=-l_1$ и $x=l_1$ имеет место равенство температур (5) и тепловых потоков (6).

Граничное условие (7) описывает значение температуры на поверхностях $x=-l_1-l_2$ и $x=l_1+l_2$, что соответствует схеме контактной термической вулканизации.

Решение системы уравнений (1)–(2) для краевых (3)–(7) проведено при использовании преобразований Лапласа и может быть представлено в виде

$$t_1\left(x,\tau\right)=T+$$
$$+\sum_{m=1}^{\infty}\frac{A_m\cos\left(\mu_m\frac{x-l_1}{l_1}\right)+B_m\sin\left(\mu_m\frac{x-l_1}{l_1}\right)}{C_m}e^{-\mu_m^2 Fo}, \tag{8}$$

$$t_2\left(x,\tau\right)=T+$$
$$+\sum_{m=1}^{\infty}\frac{A_m\cos\left(K_2\mu_m\frac{x-l_1}{l_1}\right)+K_1B_m\sin\left(K_2\mu_m\frac{x-l_1}{l_1}\right)}{C_m}\cdot e^{-\mu_m^2 Fo}, \tag{9}$$

где

$$A_m=\left(T-t_0\right)\cos\mu_m;\; B_m=-\left(T-t_0\right)\sin\mu_m;$$

$$C_m=-\frac{1}{2}\mu_m K_1\left[\cos\mu_m\cdot\sin\left(K_2\mu_m\right)+K_2\sin\mu_m\cdot\cos\left(K_2\mu_m\right)\right]-$$
$$-\frac{1}{2}\mu_m\left[\sin\mu_m\cdot\cos\left(K_2\mu_m\right)+K_2\cos\mu_m\cdot\sin\left(K_2\mu_m\right)\right];$$

$$K_1=\sqrt{\frac{a_2}{a_1}}\frac{\lambda_1}{\lambda_2};\; K_2=\sqrt{\frac{a_1}{a_2}}\frac{l_2}{l_1};$$

$Fo=\frac{a_1\tau}{l_1^2}$ – критерий Фурье; $\mu_m>0$ $\left(m=1,2,\ldots\right)$ – корни характеристического уравнения

$$\cos\mu\cdot\cos\left(K_2\mu\right)-K_1\sin\mu\cdot\sin\left(K_2\mu\right)=0.$$

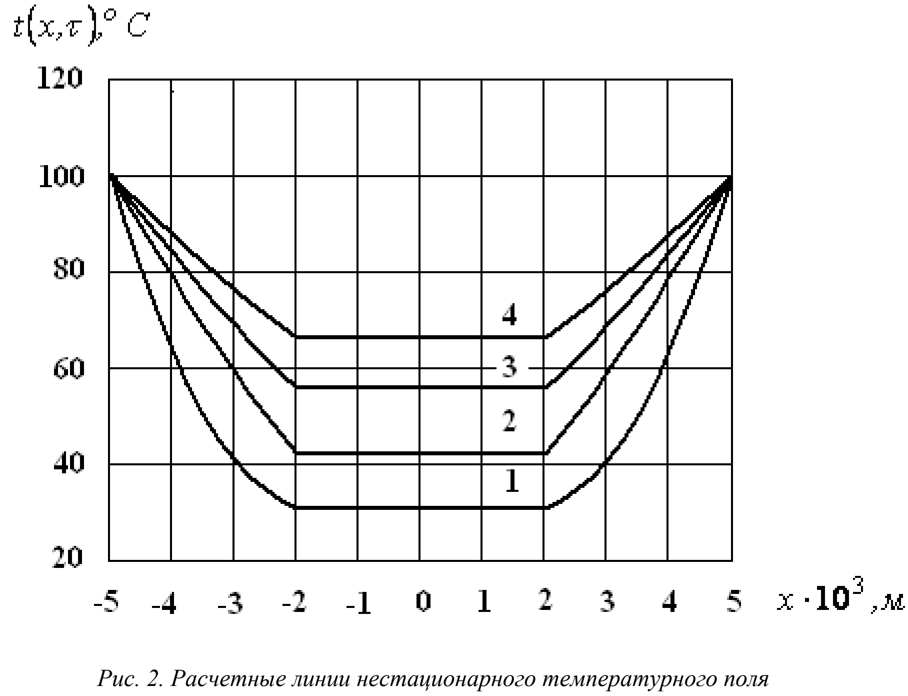


*Рис. 2. Расчетные линии нестационарного температурного поля*

На рисунке 2 представлены результаты расчетов четырех линий нестационарного температурного поля, проведенные в соответствии с решением (8)–(9).

Расчеты выполнены для случая вулканизации слоев эластомера марки 2566, нанесенных на пластину из стали марки Ст. 3. Значения параметров при этом составляли: $l_1 = 2.0 \cdot 10^{-3}\,м$ ; $l_2 = 3 \cdot 10^{-3}\,м$ ; $t_0 = 30^o\,C$ ; $T = 100^o C$.

Линии 1, 2, 3, 4 соответствуют следующим значениям времени: $\tau_1 = 10\,c$; $\tau_2 = 45\,c$; $\tau_3 = 90\,c$; $\tau_4 = 135\,c$.

Экспериментальная проверка расчетов нестационарных температурных полей в соответствии с предложенной математической моделью доказала возможность ее применения в инженерной практике при установлении оптимальных режимов контактной термической вулканизации покрытий эластомера для симметричной системы эластомер-металл-эластомер.

**Литература**

1. Аваев, А. А. Аналитические модели теплопереноса в резинометаллических системах в процессах термической вулканизации резиновых обкладок при малой концентрации вулканизующего агента / А. А. Аваев, Ю. Р. Осипов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 5 (66). – С. 5–9.

2. Лукомская, А. И. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий / А. И. Лукомская, П. Ф. Баденков, Л. М. Кеперша. – Москва : Химия, 1972. – 359 с.

**A.A. Avaev**

**HEAT TRANSFER DURING ELASTOMER THERMAL VULCANIZATION IN SYMMETRIC ELASTOMER-METAL-ELASTOMER SYSTEM**

This mathematical model is an attempt to describe unsteady heat transfer during contact thermal vulcanization of an elastomer in the elastomer-metal-elastomer system. The description of this process is very difficult. This is due to the occurrence of physicochemical processes and the change in the thermophysical properties of the elastomer during its vulcanization. In the case when the content of free sulfur in the elastomer is relatively small, modeling of the heat transfer process is simplified. The mathematical model being proposed is based on the solution of the system of heat conduction linear equations. This model can be used in modern engineering practice.

Elastomer-metal-elastomer system, mathematical modeling, contact thermal vulcanization, free sulfur, elastomer layer, system heat conduction linear equations, Laplace transform.