



**ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРА
В СИСТЕМЕ МЕТАЛЛ – ЭЛАСТОМЕР**

Статья посвящена исследованию оптимизации процесса вулканизации покрытия из эластомера, нанесенного на металлическую основу. Данное исследование проводилось путем анализа процесса нестационарной теплопроводности при термической вулканизации эластомера в системе металл – эластомер. Математическая модель построена на основе аналитического решения системы уравнений теплопроводности при соответствующих краевых условиях. Задача исследований состояла в выборе таких краевых условий, при которых процесс вулканизации обеспечивал бы наилучшее качество слоя эластомера, нанесенного на металл. Результаты апробации предложенной модели доказали возможность ее применения в инженерной практике.

Оптимизация, процесс вулканизации, эластомер, металлическая основа, нестационарная теплопроводность, система металл – эластомер, уравнение теплопроводности, краевые условия.

Покрытия на основе эластомера, нанесенные на металлическую основу, широко используются в современной технике. Основным назначением таких покрытий является защита металла от воздействия агрессивной среды и механических воздействий, что позволяет, в частности, использовать менее дорогие металлы и сплавы.

Покрытие из эластомера наносится на металлическую основу, после чего эластомер подвергается вулканизации в целях придания ему необходимых свойств. Процесс вулканизации должен проходить таким образом, чтобы эластомер сохранял требуемые свойства и при этом надежно крепился к металлической основе, что позволяло бы подвергать единую систему металл – эластомер механическим воздействиям при изготовлении деталей различных размеров и форм.

Основным методом вулканизации является термический метод, при котором эластомер подвергается нагреву, сопровождающемуся рядом физико-химических процессов [1]. При этом оптимальным условием нагрева системы металл – эластомер является равенство значений температуры на обеих поверхностях эластомера [2]. В связи с этим предпочтительным является контактный метод подвода тепла к внешним поверхностям системы, когда на этих поверхностях поддерживаются определенные значения температуры, которые в общем случае представлены функциями времени τ . Цель исследований – установление вида таких функций, которые обеспечивали бы оптимальные условия вулканизации эластомера.

Систему металл – эластомер предлагается рассматривать в виде двухслойной бесконечной пластины общей толщины $l_1 + l_2$. Индекс j ($j = 1; 2$) обозначает номер слоя пластины: значение $j = 1$ соответствует эластомеру, а значение $j = 2$ – металлу.

Математическая модель основывается на решении системы двух уравнений теплопроводности:

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

$$(-l_1 < x \leq 0)$$

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

$$(0 < x < l_2),$$

где $t_j(x, \tau)$ – температура в точке с координатой x в момент времени τ , °С; a_j – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Для решения системы дифференциальных уравнений (1)–(2) предлагается использовать следующие краевые условия:

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_0 = const, \quad (3)$$

$$t_1(0, \tau) = t_2(0, \tau), \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(0, \tau)}{\partial x}, \quad (5)$$

где λ_j – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);

$$t_1(-l_1, \tau) = t_1 = const; \quad (6)$$

$$t_2(l_2, \tau) = t_1 + (t_2 - t_1)e^{-k\tau}. \quad (7)$$

$$(t_2 = const; k = const > 0; t_2 \geq t_1)$$

Условие (3) является начальным и предполагает одно и то же значение температуры в момент времени $\tau = 0$ во всех точках обоих слоев.

Граничные условия (4)–(5) отвечают идеальному тепловому контакту на поверхности $x = 0$, разделяющей эластомер и металл. Они описывают равенство значений температуры (условие (4)) и равенство тепловых потоков (условие (5)).

Условия (6)–(7) являются граничными условиями первого рода, что соответствует процессу контактной

термической вулканизации. При этом на внешней поверхности $x = -l_1$ эластомера предполагается задавать постоянное значение t_1 температуры, которое исключало бы возможную деструкцию эластомера, в то время как на внешней поверхности $x = l_2$ металла значение температуры задается в виде экспоненциальной функции времени τ . Выбор значений t_2 и k должен обеспечивать оптимальные условия процесса вулканизации – равенство значений температуры на поверхностях $x = -l_1$ и $x = 0$ эластомера.

Решение уравнения (1) для краевых условий (2)–(7) получено с помощью операционного исчисления и может быть представлено в виде

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

$$+ (t_2 - t_1) \frac{D_k \cos\left(\sqrt{\frac{k}{l_1}} x\right) + E_k \sin\left(\sqrt{\frac{k}{l_1}} x\right)}{F_k} e^{-k\tau}, \quad (8)$$

$$t_2(x, \tau) = t_1 + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m \cos\left(K_2 \mu_m \frac{x}{l_2}\right) + K_1 B_m \sin\left(K_2 \mu_m \frac{x}{l_2}\right)}{C_m} e^{-\mu_m^2 Fo} +$$

$$+ (t_2 - t_1) \frac{D_k \cos\left(\sqrt{\frac{k}{l_2}} x\right) + K_1 E_k \sin\left(\sqrt{\frac{k}{l_2}} x\right)}{F_k} e^{-k\tau}, \quad (9)$$

где

$$A_m = (t_1 - t_0) \left(k - \mu_m^2 \frac{a_1}{l_1^2} \right) K_1 +$$

$$+ \left[(t_1 - t_0) \left(k - \mu_m^2 \frac{a_1}{l_1^2} \right) - (t_2 - t_1) \mu_m^2 \frac{a_1}{l_1^2} \right] \frac{\sin \mu_m}{\sin(K_2 \mu_m)};$$

$$B_m = \left\{ \begin{array}{l} \left[(t_1 - t_0) \left(k - \mu_m^2 \frac{a_1}{l_1^2} \right) - (t_2 - t_1) \mu_m^2 \frac{a_1}{l_1^2} \right] \cos \mu_m - \\ - (t_1 - t_0) \left(k - \mu_m^2 \frac{a_1}{l_1^2} \right) \cos(K_2 \mu_m) \end{array} \right\} \frac{1}{\sin(K_2 \mu_m)};$$

$$C_m = -\frac{1}{2} \left(k - \mu_m^2 \frac{a_1}{l_1^2} \right) \times$$

$$\times \left[\frac{K_2 \mu_m \sin(K_2 \mu_m) - \frac{\sin \mu_m}{\sin(K_2 \mu_m)} + K_1 \mu_m \sin \mu_m +}{\sin^2(K_2 \mu_m)} + \frac{K_2 \mu_m \sin \mu_m \cos(K_2 \mu_m) - \mu_m \sin(K_2 \mu_m) \cos \mu_m \cos(K_2 \mu_m)}{\sin^2(K_2 \mu_m)} \right];$$

$$D_k = \frac{\sin\left(\sqrt{\frac{k}{a_1}} l_1\right)}{\sin\left(K_2 \sqrt{\frac{k}{a_1}} l_1\right)};$$

$$E_k = \frac{\cos\left(\sqrt{\frac{k}{a_1}} l_1\right)}{\sin\left(K_2 \sqrt{\frac{k}{a_1}} l_1\right)};$$

$$F_k = K_1 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{a_1}} l_1\right) + \cos\left(K_2 \sqrt{\frac{k}{a_1}} l_1\right) \frac{\sin\left(\sqrt{\frac{k}{a_1}} l_1\right)}{\operatorname{sh}\left(K_2 \sqrt{\frac{k}{a_1}} l_1\right)};$$

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

$Fo = a_1 \tau / l_1^2$ – критерий Фурье; $\mu_m > 0$ – корни характеристического уравнения

$$\sin \mu \cdot \cos(K_2 \mu) + K_1 \sin(K_2 \mu) \cdot \cos \mu = 0.$$

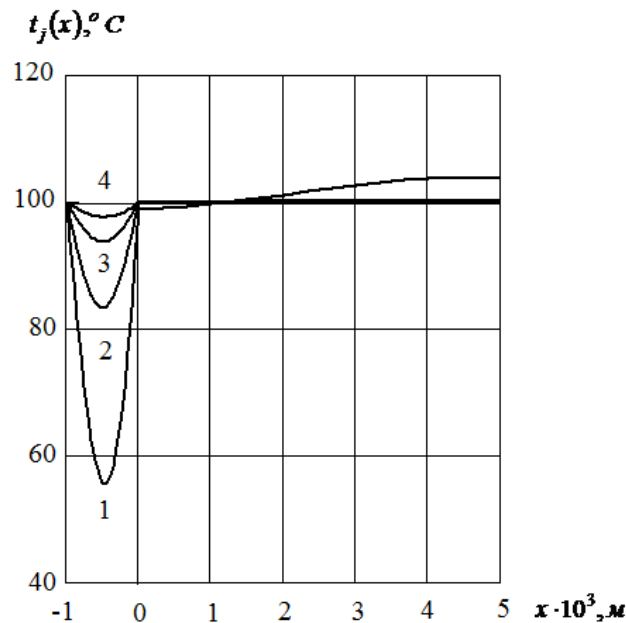


Рис. 1. Линии температурного поля, рассчитанные с помощью решения (8)–(9) при $t_1 = 100^\circ\text{C}$, $t_2 = 300^\circ\text{C}$, $k = 4,1, 1/\text{с}$

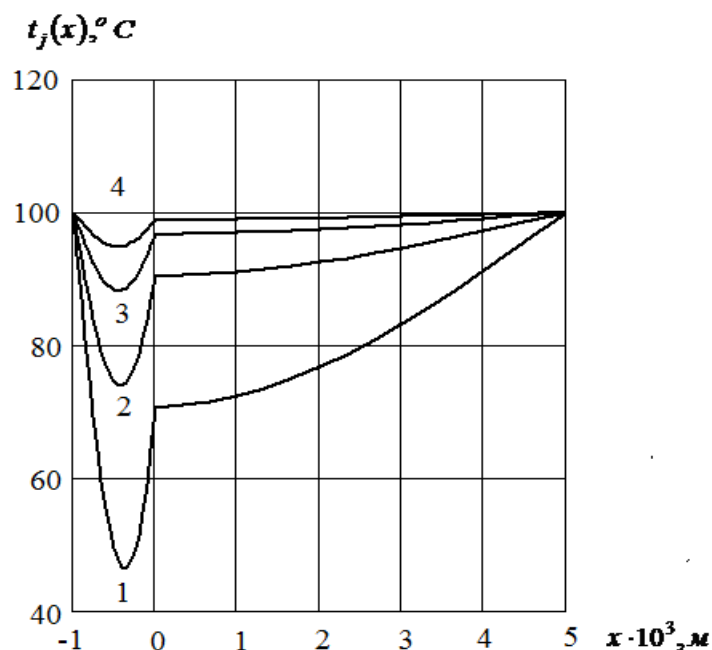


Рис. 2. Линии температурного поля, рассчитанные с помощью решения (8)–(9) при $t_2 = t_1 = 100^\circ\text{C}$

На рисунке 1 представлены результаты расчетов линий температурного поля, выполненных в соответствии с решением (8)–(9). При проведении расчетов предполагалось, что на пластину из стали Ст3 нанесен слой эластомера марки 2566. При этом использованы следующие значения параметров: $l_1 = 0,001$ м; $l_2 = 0,005$ м; $t_0 = 25^\circ\text{C}$; $t_1 = 100^\circ\text{C}$; $t_2 = 300^\circ\text{C}$; $k = 4,1, 1/\text{с}$.

Линии 1, 2, 3, 4 температурного поля соответствуют следующим значениям времени: 1 – $\tau = 1$ с; 2 – $\tau = 2$ с; 3 – $\tau = 3$ с; 4 – $\tau = 4$ с.

Из рисунка 1 следует, что при выбранных параметрах t_2, k достаточно точно выполняется условие равенства значений температуры на поверхностях $x = -l_1$ и $x = 0$ эластомера.

Для сравнения на рисунке 2 приведены результаты расчетов, проведенных в соответствии с решением (8)–(9) при условии $t_2 = t_1 = 100^\circ\text{C}$. Расчеты линий температурного поля, представленных на рисунке 2, производились для тех же значений времени τ , что и для линий рисунка 1. При этом на рисунке 2 явно

прослеживается несовпадение значений температуры на поверхностях $x = -l_1$ и $x = 0$ эластомера. Такое несовпадение может негативно повлиять на качество вулканизации эластомера и прочность его крепления к металлической пластине.

Апробация предлагаемой математической модели доказала возможность ее применения при проведении инженерных расчетов с целью прогнозирования оптимального режима контактной термической вулканизации эластомера в системе металл – эластомер.

Литература

1. Лукомская, А. И. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий / А. И. Лукомская, П. Ф. Баденков, Л. М. Кеперша. – Москва : Химия, 1972. – 360 с.
2. Аваев, А. А. Математическое моделирование нестационарной теплопроводности при вулканизации эластомерных покрытий на тканевых и металлических подложках : монография / А. А. Аваев. – Череповец : ГОУ ВПО ЧГУ, 2010. – 133 с.

A.A. Avaev
Cherepovets State University

ELASTOMER VULCANIZATION PROCESS OPTIMIZATION IN METAL – ELASTOMER SYSTEM

The presented work is devoted to the study of vulcanization process optimization of the elastomer coating applied to a metal base. This study was carried out by analyzing the process of non-stationary heat conduction during thermal vulcanization of an elastomer in a metal – elastomer system. The mathematical model is based on the analytical solution of the system of heat conduction equations under the appropriate boundary conditions. The research task consisted in the selection of such boundary conditions under which the vulcanization process provided the best quality of the elastomer layer applied to the metal. The results of approbation of the proposed model proved the possibility of its application in engineering practice.

Optimization, vulcanization process, elastomer, metal base, non-stationary heat conduction, metal – elastomer system, heat conduction equation, boundary conditions.