

*А. И. Скоморохова**

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА СТЕПЕНИ ВУЛКАНИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ANSYS

Наиболее распространенный метод вулканизации – вулканизация в пресс-форме под давлением. Резиновая смесь формируется в нагретой пресс-форме, которая затем замыкается между нагретыми плитами прессы [1]. При этом температура нагревательных плит прессы в зависимости от типа обогрева и состава вулканизируемой смеси, как правило, находится в интервале $140...170^{\circ}\text{C}$.

В данной работе температура нагревательных плит принималась равной $T = 160^{\circ}\text{C}$, начальная температура резиновой смеси составляла 20°C . Тогда в одномерной постановке задачи расчетная модель вулканизации резиновой пластины толщиной h выглядит, как показано на рис. 1.

* Работа выполнена под руководством кандидата технических наук, доцента ФГБОУ ВО «ТГТУ» А. О. Глебова.

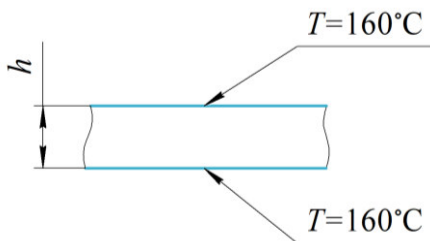


Рис. 1. Расчетная модель вулканизации резиновой пластины

В расчетах процесса вулканизации используется нестационарное уравнение теплопроводности. Для модели, изображенной на рис. 1, оно записывается следующим образом:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{Q}, \quad (1)$$

где c – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); \dot{Q} – удельное тепловыделение, Вт/м³.

Как правило, теплоемкость каучука с увеличением температуры увеличивается, а плотность уменьшается, поэтому в теоретических исследованиях произведение $c \cdot \rho$ в уравнении теплопроводности считают постоянным и значения c и ρ , следовательно, константы. При описании параметров модели плотность и теплоемкость резиновой смеси протектора шины задавались $\rho = 1127$ кг/м³ и $c = 717$ Дж/(кг·К) соответственно [2].

В процессе вулканизации теплопроводность резиновой смеси также не остается постоянной, а изменяется по линейной зависимости:

$$\lambda = a - \frac{b}{T}, \quad (2)$$

где a и b – безразмерные эмпирические коэффициенты ($a = 0,1612$; $b = 2 \cdot 10^{-4}$ [2]).

Авторами работы [3] была предложена следующая модель для расчета продолжительности индукционного периода:

$$\bar{t} = \int_0^t \frac{dt}{t_0 e^{T_0/T}(T)}, \quad (3)$$

где t_0 и T_0 – константы материала (принимая $t_0 = 4,104 \cdot 10^{-10}$ с; $T_0 = 11713$ К [2]); T – температура, К; \bar{t} – безразмерный показатель окончания индукционного периода (когда показатель принимает значение 1, начинается этап вулканизации).

Для описания процесса вулканизации использовалась модель:

$$\left(\frac{\alpha_i}{1 - \alpha_i} \right)^{1/n} = \left(\frac{\alpha_{i-1}}{1 - \alpha_{i-1}} \right)^{1/n} + \left(\int_{t_{i-1}}^{t_i} k^{1/n} dt \right), \quad (4)$$

где α – степень вулканизации; n – порядок реакции (принимая $n = 2,91$ [2]); k – константа скорости вулканизации, описываемая уравнением Аррениуса:

$$k = k_0 e^{(-E/RT)}, \quad (5)$$

где k_0 – постоянная, называемая предэкспоненциальным множителем ($k_0 = 1,4 \cdot 10^{25}$ [2]); E – энергия активации ($E = 260\,622$), Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Удельное тепловыделение из формулы (1) задавалось в расчетах следующим образом [4]:

$$\dot{Q} = Q_\infty \frac{d\alpha}{dt}, \quad (6)$$

где Q_∞ – удельная теплота реакции вулканизации ($Q_\infty = 1,673 \cdot 10^7$ [2]), Дж/м³.

Для выполнения расчетов использовалась система конечно-элементного анализа ANSYS, в которой модель вулканизируемой пластины разбивалась на сетку 8×1 из 4-узловых конечных элементов PLANE55. Так как модель симметричная, при расчетах рассматривалась только верхняя часть, как показано на рис. 2. Граничное условие первого рода (температура нагревательной плиты $T = 160$ °С) накладывалось на верхнюю линию модели.

В процессе расчета температурное поле модели менялось, как показано на рис. 3.

Из рисунка 3 видно, что фронт максимальной температуры в процессе вулканизации движется от поверхности резиновой пластины к ее центру. Это объясняется тепловыделением химической реакции. По завершении вулканизации температурное поле постепенно выравнивается, и температура во всех частях резиновой пластины приближается к 160 °С.

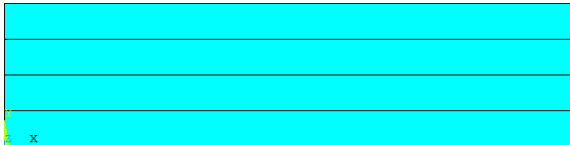


Рис. 2. Конечно-элементная модель резиновой пластины в системе ANSYS

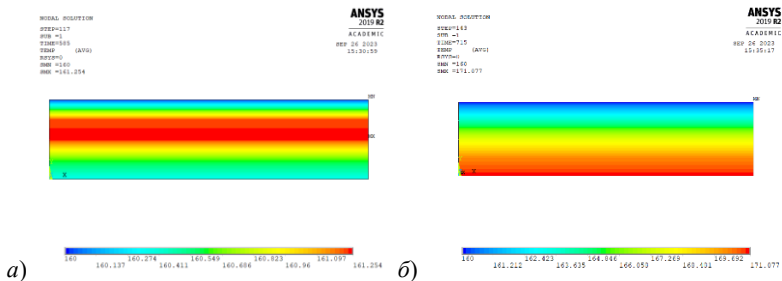


Рис. 3. Температурное поле резиновой пластины в моменты времени: а – 585 с; б – 715 с

В результате расчета были получены графики степени вулканизации и изменения температуры для наиболее удаленного от поверхности пластины конечного элемента (рис. 4).

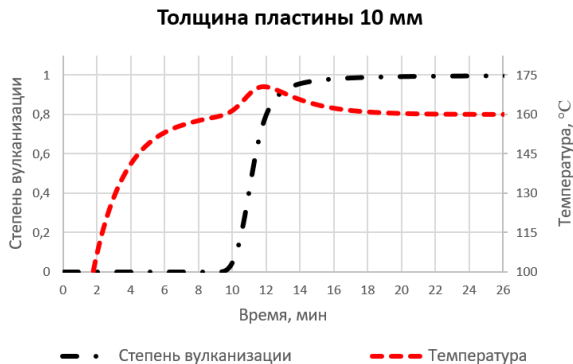


Рис. 4. Графики степени вулканизации и изменения температуры

Таким образом, представлен подход к теоретическому исследованию кинетики процесса вулканизации резиновой пластины в системе конечно-элементного анализа ANSYS. Его применение позволит сократить временные и материальные затраты на проведение физических экспериментов для определения оптимальных параметров процесса – времени и температуры.

Список литературы

1. Оборудование и основы проектирования заводов резиновой промышленности / Н. Г. Бекин, Н. Д. Захаров, Г. К. Пеунков и др. – Л. : Химия. – 1985. – С. 219.
2. Ghoreishy, M. H. R. Three-dimensional finite element modeling of rubber curing process / M. H. R. Ghoreishy, G. Naderi // J. Elastom. Plast. – 2005. – Т. 37, No. 1. – P. 37 – 53.
3. Isayev, A. Nonisothermal vulcanization of rubber compounds / A. Isayev, J. Deng // Rubber Chem. Technol. – 1988. – Т. 61, No. 2. – P. 340 – 361.
4. Ghoreishy, M.H.R. A state-of-the-art review on the mathematical modeling and computer simulation of rubber vulcanization process / M.H.R. Ghoreishy // Iranian Polymer Journal. – 2016. – Т. 25, № 1. – P. 89 – 109.

*Кафедра «Компьютерно-интегрированные системы
в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ»*