

В. А. ИЩЕНКО, М. В. ШАПТАЛА (ДИИТ)

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Розроблена методика розрахунку тривимірного температурного поля методом скінченних елементів для визначення часу вулканізації еластомерних виробів, які мають складну поверхню нагріву. На прикладі великогабаритної шини показано, що з урахуванням тривимірного розподілу температур у порівнянні із методикою плоского перетину, яка зараз використовується в промисловості, час вулканізації можна зменшити на 6...8 %. Це дає суттєву економію теплової енергії в умовах масового виробництва.

Разработана методика расчета трехмерного температурного поля методом конечных элементов для определения времени вулканизации эластомерных изделий с геометрически сложными поверхностями нагрева. На примере крупногабаритной шины показано, что учет трехмерности распределения температур по сравнению с методикой плоского сечения, которая в настоящее время применяется в промышленности, позволяет на 6...8 % сократить время вулканизации, что приводит к существенной экономии тепловой энергии в условиях массового производства.

A procedure has been developed of calculating a 3-D temperature field with application of FEM for determination of vulcanization time of elastomer products with geometrically complex heating surfaces. On the example of heavy-duty tire it has been shown that the account of the 3-D nature of temperature distribution allows to reduce vulcanization time by 6–8 % in comparison with the plane section procedure, which is currently used in industry, which results in significant savings of thermal energy in conditions of commercial production.

Технологией изготовления эластомерных изделий предусмотрена вулканизация, в процессе которой сырая заготовка за счет выдержки при высокой температуре и давлении в пресс-формах приобретает нужную геометрию, а эластомерный материал необходимые свойства. Тепловой режим вулканизации индивидуален для каждого изделия. Неправильно выбранный тепловой режим либо приведет к перерасходу дорогостоящей тепловой энергии, либо не обеспечит изделию необходимое качество. Поэтому выбор рационального режима вулканизации резиновых и резинотехнических изделий, а особенно многослойных изделий сложной геометрической формы, например, пневматических шин, является актуальной задачей.

Для разработки рационального режима вулканизации эластомерного изделия необходимо знание его температурных полей с целью определения времени достижения необходимой степени вулканизации в так называемой холодной точке конструкции, т. е. в такой точке, температура в которой минимальна. Температурное поле шины определяется теплофизическими характеристиками материалов, которые являются функциями температуры, сложной геометрии поверхностей нагрева, внутренними источниками тепла, обусловленными тепловыделениями при химических реакциях вулканизации и переменными по времени температурами на наружной и внутренней поверхностях шины.

Вне зависимости от типа вулканизационно-оборудования покрышки нагреваются в ме-

таллических прессформах, обогреваемых паром; внутренний нагрев и прессование осуществляется путем закладки внутрь покрышек резиновых варочных камер или диафрагм. Вид и параметры теплоносителей со стороны формы и диафрагмы неодинаковы (рис. 1).

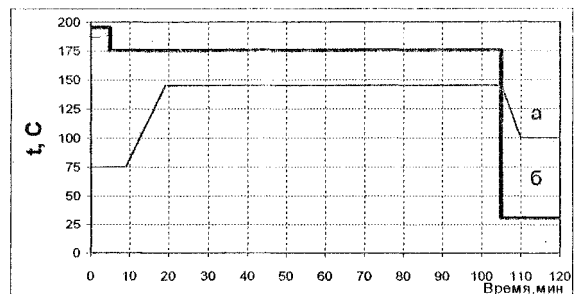


Рис. 1. График изменения граничных условий

Тепловая задача такого рода не может быть решена аналитическими методами. Последние целесообразно использовать только для предварительных ориентировочных оценок. Так, вместо сложного составного тела в первом приближении может рассматриваться однородная неограниченная пластина, для которой имеется решение – распределение по толщине и изменение во времени температуры [1].

В настоящее время для построения режимов вулканизации пневматических шин используется либо метод приведенной пластины [2], при котором рассчитывается одномерное температурное поле, либо метод плоского сечения [3], форма которого учитывает особенности протектора шины, для которого рассчитывается

двумерное температурное поле. В первом случае необходимо задать такую толщину пластины, которая бы учитывала насыщенность рисунка протектора и ряд других факторов. Во втором случае в шине выбирается наиболее труднопрогретаемое сечение, выбор которого основан на опыте и интуиции исследователя.

При проведении подобного рода расчетов пренебрегают кривизной профиля покрышки, непараллельностью слоев, разными начальными температурами формы, покрышки и камеры, зависимостью теплофизических характеристик от температуры, с заменой трехмерных (в рисунке протектора) тепловых потоков, выделение теплоты реакции вулканизации.

С целью учета всех особенностей конструкции шины, теплофизических характеристик материалов и внутренних источников тепла разработана методика расчета трехмерного температурного поля с применением метода конечных элементов.

Уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах для расчета температурных полей в трехмерном виде с внутренними источниками тепла, обусловленными тепловыделениями при протекании химической реакции вулканизации:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_p \rho},$$

где коэффициент температуропроводности

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho};$$

λ, c_p, ρ – теплопроводность, теплоемкость и плотность соответственно; q_v – внутренние источники тепла; оператор Лапласа (для цилиндрической системы координат)

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

В начальный момент времени температура изделия во всех слоях одинакова и соответствует заданной

$$T_0 = T_{\text{зад}}.$$

В расчете принималось равенство температур

поверхности пресс-формы и диафрагмы соответствующим температурам теплоносителей. Температура на внутренней и наружной поверхностях изделия является функцией времени т. е. заданы граничные условия 1-го рода (см. рис. 1).

Геометрическая модель крупногабаритной шины с конечно-элементной сеткой представлена на рис. 2 с отображением всех особенностей рисунка протектора и конструкции в целом, а также с указанием типов материалов. Ввиду симметричности приведен один шаг шины.

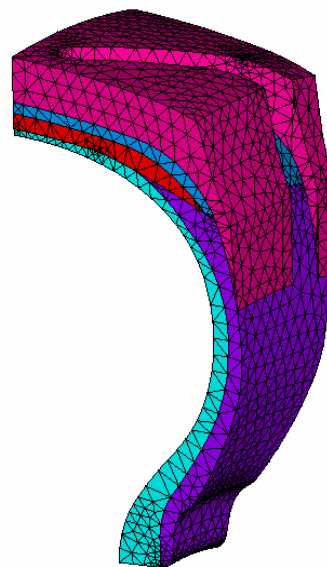


Рис. 2. Расчетная модель

Теплофизические характеристики материалов являются функциями температуры.

Величина внутренних источников тепла определяется тепловым эффектом реакции вулканизации, который зависит от химического состава резин.

Сравнительные расчеты температурных полей различных вариантов выполнены с использованием конечно-элементного пакета MSC Marc. Первый вариант расчета соответствовал методу приведенной пластины, толщина которой выбиралась в соответствии с [1]. Во втором варианте рассчитывалось плоское сечение [2], которое соответствовало угловой зоне, где толщина покрышки максимальна. Третий вариант соответствовал реальной конструкции (см. рис. 2). Основные результаты расчета представлены в таблице.

Таблица

Сравнительная таблица времени вулканизации

Параметри	Одномерная задача	Двумерная задача	Трехмерная задача	
			Без вн. источников	С вн. источниками
Время достижения 90 % величины модуля сдвига, в %, относительно одномерной задачи	100	91,4	88	85,2
Экономия тепла по сравнению с одномерным расчетом, %		8,6	12	14,8

Таким образом, для крупногабаритной шины с относительно простым рисунком протектора учет трехмерности конструкции и внутренних источников тепла позволяет на 6,2 % сократить время вулканизации, однако, это преимущество не следует распространять на другие типы шин, ввиду существенного влияния вида рисунка протектора, граничных условий и других исходных данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. –599 с.

2. Аранович Ф. Д. Расчет продолжительности вулканизации покрышек сельскохозяйственных и крупногабаритных автомобильных шин методом приведенной пластины, / Ф. Д. Аранович, В. А. Ищенко, Л. Б. Никитина, М. И. Свердел // Каучук и резина. 1976 – № 6. – С. 28–32.
3. Свердел М. И. Программное обеспечение проектирование режимов и некоторые аспекты повышения эффективности процесса вулканизации покрышек пневматических шин /М. И. Свердел, А. В. Зимин, Е. А. Дзюра и др. // Вопросы химии и химических технологий. 2002. – № 4.

Поступила в редколлегию 15.03.2005.