

РАЗРАБОТКА ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ В ПРОЦЕССЕ ЕГО ОБРАБОТКИ НА ВУЛКАНИЗАЦИОННОМ ПРЕССЕ

С.В. Карпушкин¹, С.В. Лавров², К.С. Корнилов¹

Кафедра «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ГОУ ВПО «ТГТУ» (1); кафедра «Промышленная энергетика», ГОУ ВПО «Воронежская государственная технологическая академия» (2); karp@mail.gaps.tstu.ru

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: вулканизационный пресс; моделирование температурного поля; индукционный нагрев; пресс-форма; резинотехническое изделие.

Аннотация: Рассмотрены особенности математического моделирования процесса нагрева резинового уплотнения в пресс-форме на вулканизационном прессе с помощью системы COMSOL. На основе результатов анализа температурных полей системы «плита–пресс-форма–изделие» сформулированы основы методики проектирования нагревательных плит для получения конкретной продукции.

Наиболее часто резинотехнические изделия (**РТИ**) изготавливаются методом горячего прессования, который представляет собой последовательность следующих операций: вулканизируемая смесь помещается в матрицу пресс-формы, прижимается пуансоном и нагревается при заданных температуре и давлении. Широко применяемым оборудованием для горячего прессования являются гидравлические вулканизационные прессы с индукционным способом нагрева плит.

Качество продукции во многом определяется равномерностью температурного поля в объеме изделия. На равномерность поля влияют параметры пресс-формы (геометрия, теплофизические свойства) и системы ее обогрева (мощность и расположение нагревательных элементов – индукторов), позиционирование пресс-формы на поверхности плиты, теплофизические свойства материала изделия, плиты и пресс-формы.

Предельной задачей является создание требуемого температурного поля во всем объеме прессуемого изделия. Для ее выполнения необходимо моделировать процессы распространения тепла в системе «плита–пресс-форма–изделие». Важно отметить, что данную задачу необходимо рассматривать как трехмерную нестационарную, учитывая нелинейные зависимости теплофизических свойств материалов от температуры нагрева.

В научных публикациях, как правило, моделируются двумерные задачи при допущениях о постоянстве свойств материалов изделия, нагревательной плиты и

пресс-формы в заданных интервалах температур. Однако по справедливым замечаниям самих авторов, для эффективного моделирования температурного поля пресс-формы и вулканизируемого изделия необходимо рассчитывать трехмерные модели [1]. Это можно сделать, используя для компьютерного моделирования современные САД- и САЕ-системы.

Для точного математического описания процесса индукционного нагрева следует рассматривать серию связанных задач: электромагнитную, тепловую, гидродинамическую, механическую, металлургическую [2]. В инженерных расчетах систем индукционного нагрева рассматриваются две первые задачи, то есть моделирование процесса индукционного нагрева относится к классу связанного анализа, состоящего из квазистационарной электромагнитной задачи и задачи расчета нестационарного температурного поля. Наиболее сложным, с точки зрения задания исходных данных и расчета, является гармонический электромагнитный анализ.

Результатом решения задачи электромагнитного анализа является тепловыделение, которое используется при решении задачи теплового анализа в качестве объемного граничного условия. При известных тепловыделениях индукторов возможно проведение только теплового анализа, реализация которого не вызывает больших трудностей. Для исключения электромагнитного анализа введем следующие допущения.

1. Задачи определения мощности, выделяемой в пазах индукторов, и распространения тепла в материале плиты решаются независимо друг от друга, поскольку требуемая температура нагрева плиты не превосходит температуру Кюри $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

2. Тепловыделение осуществляется равномерно во всем объеме паза под каждый индуктор, для определения значений мощностей индукторов используется методика, основанная на экспериментальных исследованиях индукционного нагрева ферромагнитной стали [3]. Характеристики материала объема, заполняемого индуктором и специальной органосиликатной композицией, соответствуют свойствам материала плиты.

3. Тепловые эффекты вулканизации резинового уплотнения незначительны по сравнению с мощностями индукторов и ими можно пренебречь.

Моделирование процесса нагрева пресс-формы на вулканизационном прессе с индукционным методом обогрева плит реализовано в системе COMSOL [4] и состоит из серии связанных задач: построения геометрии, задания свойств материалов, определения физической модели и построения конечно-элементной (КЭ) сетки.

В качестве примера рассмотрим систему нагрева пресс-формы с помощью двух нагревательных плит длиной $l = 500$ мм, шириной $s = 410$ мм и высотой $h = 70$ мм с четырьмя индукторами прямоугольной формы размерами 172×127 мм в пазах сечением 25×25 мм. Ввиду симметричности конструкции плиты и с целью уменьшения объема вычислений геометрическая (расчетная) модель разработана для четверти нагревательной плиты (рис. 1).

Между четвертями верхней и нижней плиты (основания 1 и 7, индукторы 2 и 8, крышки 3 и 9 соответственно) располагается пресс-форма (матрица 4 и пуансон 6) с вулканизуемым резиновым кольцом 5. Позиционирование пресс-формы на поверхности плиты осуществляется таким образом, чтобы оси симметрии индукторов и пресс-формы совпадали. Пресс-форма соответствует ГОСТ 26619–85 «Пресс-формы одноместные для изготовления манжет гидравлических устройств». Диаметр матрицы и пуансона – 124 мм, диаметр вулканизуемого кольца – 6 мм. Основания и крышки плит изготовлены из стали 45 [5].

Согласно принятым допущениям, индукторы можно рассматривать как комбинации параллелепипедов, изготовленных из стали 45, объемы которых соответствуют объемам пазов в плитах (элементы 1 и 7 на рис. 1). В качестве материала вулканизируемого изделия выбран наиболее распространенный тип каучука общего назначения – бутадиен-стирольный каучук (СКС), содержание стирольных звеньев в котором составляет 23 % [6]. Для учета влияния вулканизации на температурное поле использованы зависимости теплофизических свойств каучука от температуры из встроенной в COMSOL библиотеки материалов.

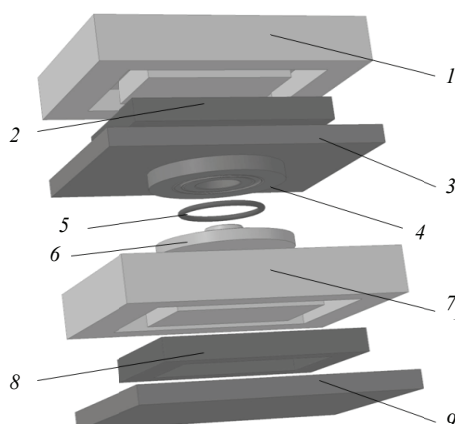


Рис. 1. Геометрическая модель системы нагрева:

- 1, 7 – основания плит; 2, 8 – индукторы;
3, 9 – крышки плит; 4 – матрица;
5 – изделие (резиновое кольцо);
6 – пуансон

Источниками тепла считаются объемные фигуры 2 и 8 (см. рис. 1). Для учета нелинейного изменения мощностей индукторов с течением времени нагрева осуществлена сплайн-интерполяция предварительно рассчитанных значений мощности индукторов при разных значениях температуры нагрева [3].

Для расчета температурного поля изделия необходим учет теплообмена плит и пресс-формы с окружающей средой. В COMSOL имеются возможности расчета конвективного и лучистого теплообмена, однако, с целью уменьшения нагрузки на вычислительные ресурсы компьютера, для учета внешнего теплообмена предварительно рассчитывались значения коэффициентов теплоотдачи от поверхностей нагревательных плит и пресс-формы [7].

Для построения КЭ модели использован тетраэдрический тип сетки. Максимальный размер элемента 4 мм, минимальный – 0,25 мм. В итоге, сгенерированная сетка имеет 2002421 элемент. Сетка наибольшей плотности формируется непосредственно в вулканизуемом кольце.

С использованием системы COMSOL произведено моделирование нестационарного температурного поля системы, изображенной на рис. 1. Конечное время нагрева (2450 с) соответствует средней объемной температуре резинового кольца 180 °С – оптимальной температуре вулканизации СКС [6]. Моделирование осуществлено с помощью программы COMSOL 4.0.0.937 на компьютере с четырехъядерным процессором Intel Core 2 Quad Q6600 (частотой одного ядра 2,4 МГц), объемом оперативной памяти 8 Гб, операционной системой Microsoft Windows Server 2008×64. Продолжительность расчета составила 72,3 мин. На рис. 2, а представлено полученное в результате объемное температурное поле системы, на рис. 2, б – температурное поле поперечного сечения системы, на рис. 3 – температурное поле продольного сечения резинового кольца.

Максимальный перепад температур по объему моделируемой системы составил 21,6 °С. Наибольшая температура 190,9 °С наблюдается на внутренних поверхностях плит, а минимальная 169,3 °С – на наружных углах плит. Максимальная разница температур в поперечном сечении моделируемой системы (см. рис. 2, б) составила 14,4 °С. Наибольшая температура 190,7 °С наблюдается в объеме индукторов, наименьшая 176,3 °С – на торцах плит. Отметим наличие объемного перегрева системы в ее центральной области (правая часть на рис. 2, б), который вызван неоптимальным расположением индукторов в объеме плиты и пресс-формы на ее поверхности.

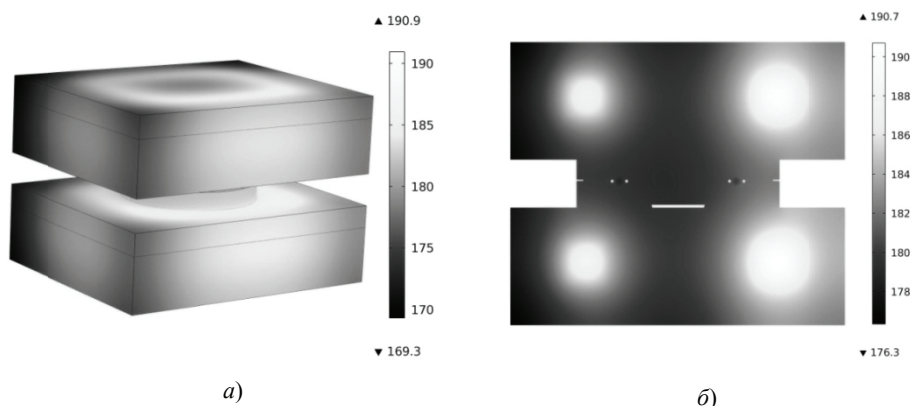


Рис. 2. Температурные поля:
a – четверти моделируемой системы; *б* – поперечного сечения системы

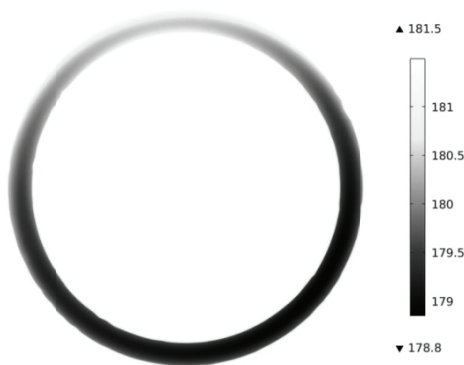


Рис. 3. Температурное поле продольного сечения резинового кольца

Как видно из рис. 3, максимальный перепад температур в продольном сечении кольца составляет 2,7 °С. Максимальная температура 181,5 °С соответствует внешней поверхности кольца, находящейся вблизи центра плиты, минимальная 178,8 °С – противоположной внутренней части кольца.

По методике, изложенной в [8], произведен расчет температурного поля рабочей поверхности нагревательной плиты, соответствующего ее средней температуре 180 °С: минимальную температуру 173,2 °С

имеют края поля, соответствующие центру и углам плиты, максимальная температура 182,7 °С наблюдается непосредственно над индуктором, ближе к центру плиты. Как видно, данная плита формирует температурное поле с перепадом температур на рабочей поверхности около ± 5 °С, однако конечный перепад температур внутри вулканизуемого изделия составляет менее $\pm 1,5$ °С. Этот показатель является удовлетворительным для проведения процесса вулканизации.

Отметим, что по современным представлениям перепад температур на рабочей поверхности нагревательных плит при вулканизации не должен превышать $\pm 1...2$ °С. Однако численный эксперимент показал, что существенное увеличение этого перепада не приводит к неприемлемой неравномерности температурного поля в объеме изделия.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. В каждом конкретном случае промышленного использования существующих и проектирования новых индукционных нагревательных плит следует принимать во внимание ассортимент выпускаемой на прессе продукции и требования к температурному полю в объеме изделий.

2. Неравномерность температурного поля по рабочей поверхности плиты в пределах ± 5 °С не является критичной для осуществления вулканизации РТИ.

3. Использование современных САД- и САЕ-систем является перспективным направлением в области моделирования нагрева пресс-форм на индукционных плитах, поскольку позволяет учесть нелинейные зависимости энергетических и теплофизических характеристик в процессе вулканизации.

4. Методически правильным является проведение численных экспериментов для наиболее распространенных пресс-форм и используемых каучуков по нахождению объемных температурных полей в вулканизуемых изделиях. Целью этих экспериментов является формирование правил для оптимального проектирования нагревательных плит под конкретные процессы и рекомендаций по расположению пресс-форм на плитах.

Работа выполнена в рамках государственного контракта № 14.740.11.0961 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы».

Список литературы

1. Завьялов, А.В. Разработка информационных моделей температурных полей при вулканизации резинотехнических изделий / А.В. Завьялов // Теплофизика в энергосбережении и управлении качеством : мат. 6-й междунар. теплофиз. шк. / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2007. – Ч. II. – С. 26–27.
2. Tavakoli, M. Computational Modeling of Induction Heating Process / M. Tavakoli, H. Karbaschi, F. Samavat // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2009. – Vol. 11. – P. 93–102.
3. Кувалдин, А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали / А.Б. Кувалдин. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
4. Multiphysics modeling and simulation – COMSOL [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.comsol.com>. – Загл. с экрана.
5. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин [и др.] ; под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
6. Синтетический каучук / под ред. И.В. Гарманова. – 2-е изд. перераб. – Л. : Химия, 1983. – 560 с.
7. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии / П.Г. Романков. – СПб. : Химия, 1998. – 496 с.
8. Малыгин, Е.Н. Методика теплового расчета нагревательных плит прессов для изготовления резинотехнических изделий / Е.Н. Малыгин, С.В. Карпушкин, А.С. Крушати́н // Хим. пром-сть сегодня. – 2009. – № 11. – С. 48–56.

Development of a Virtual Model of the Temperature Field of a Rubber Product in the Process of its Treatment on Vulcanizing Press

S.V. Karpushkin¹, S.V. Lavrov², K.S. Kornilov¹

Department “Computer-Aided Design of Technological Equipment, TSTU (1);

Department “Industrial Energy”, Voronezh State Technological Academy (2);

karp@mail.gaps.tstu.ru

Key words and phrases: induction heating; mold; rubber products; simulation of the temperature field; vulcanizing press.

Abstract: A common way of manufacturing rubber products is the vulcanization in the molds in hydraulic presses with the induction method of heating plates. The article discusses the features of the mathematical simulation of heating the rubber gasket in the mold on the vulcanizing presses with the using the system COMSOL. Based on the analysis of temperature fields of “the slab–mold–product” system the principles of designing methods of heating plates for specific products are formulated.

Erarbeitung des Virtualmodelles des Temperaturfeldes des gummitechnischen Erzeugnisses im Prozess seiner Bearbeitung auf der Heizpresse

Zusammenfassung: Das verbreitete Verfahren der Erzeugung der gummitechnischen Erzeugnissen ist die Vulkanisation in den Press-Formen auf den hydraulischen Pressen mit der induktiven Methode der Plattenheizung. Im Artikel werden die Besonderheiten der mathematischen Modellierung des Prozesses der Erwärmung der Gummidichtung in der Pressform auf der Heizpresse mit Hilfe des COMSOL Systems betrachtet. Auf Grund der Resultaten der Analyse der Temperaturfelder des Systems "Platte-Presse-Forme-Erzeugnis" sind die Grundlage der Methodik der Projektierung der Heizplatten für das Erhalten der konkreten Produktion formuliert.

Élaboration du modèle virtuel du champ thermique du produit de caoutchouc technique au cours de son traitement sur une presse de vulcanisation

Résumé: Dans le présent article sont examinées les particularités du modélage mathématique du processus du chauffage de la condensation de caoutchouc dans une virole sur une presse de vulcanisation à l'aide du système COMSOL. A la base des résultats des champs thermiques du système "plaque-presse-virole-article" sont formulés les fondements de la méthode de la conception des plaques de chauffage pour l'obtention des produits concrets.

Авторы: *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ГОУ ВПО «ТГТУ»; *Лавров Сергей Вячеславович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная энергетика», ГОУ ВПО «ВГТА»; *Корнилов Кирилл Сергеевич* – магистрант кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ГОУ ВПО «ТГТУ».
