



УДК 624.011.78.001.5:536.4

© С. В. Гончаров, 2008

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОМ ФОРМИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гончаров С. В. – инженер кафедры «Машины и оборудование лесного комплекса» асп. (ТОГУ)

В машиностроении центробежное формирование изделий применяется для производства деталей вращения из металлов и различных пластмасс. Изготовление втулок из антифрикционных полимерных многокомпонентных компаундов требует проведения глубоких исследований в области явлений, протекающих в процессе приготовления, полимеризации и дальнейшей обработки композиций. Для изучения влияния термодинамических условий формирования на физико-механические и другие качественные показатели изделий требуется установить зависимости, описывающие температурные процессы, протекающие при полимеризации продукта.

In machine building the centrifugal product formation is used for the production of rotating parts from metals and different plastics. The bushing fabrication from antifriction polymeric of many-component compounds requires the widespread study of the processes at work in preparation, polymerization, and further composite processing. To study the effect of thermodynamic production conditions on physico-mechanical and other qualitative indicators of details one needs to establish dependencies characterizing the processes operative in the product polymerization.

Создание управляемых технологических процессов формирования изделий из ПКМ предполагает не только исследование закономерностей и механизма формирования целевых продуктов во всем диапазоне составов и множестве структурных типов, но и активное воздействие на теплофизические параметры в ходе реакций, протекающих в полимере [1]. Построение модели реакционных процессов с однозначным определением роли в них геометрико-морфологических характеристик исходных материалов, степени влияния на процесс характеристик ком-

понентов необходимы для получения законов управления процессом. Макрокинетический подход, имеющий целью измерение температуры в функции начальных параметров процесса, позволяет получить закон, описывающий процесс формирования в любой момент времени и любой точке формы [5]. В данном случае рассматривается процесс формирования полимерного материала, его температурная сторона.

Для изучения влияния термодинамических и технологических факторов центробежного формирования способа на организацию внутренней структуры и качественные характеристики изделий ПКМ использовалась специальная установка центробежного формирования изделий из ПКМ с частотным регулированием электропривода, контролем температуры и управлением от ЭВМ (рис. 1).



Рис. 1. Установка центробежного формирования СЦФ-4

Для станка СЦФ-4 применяется температурная схема, показанная на рис. 2. Согласно этой схеме тепло поступает из источника постоянной мощности P на вращающуюся цилиндрическую поверхность радиусом R_2 , и далее вследствие теплообмена поступает в материал. Однако при попадании на поверхность формы теплового потока часть содержащейся в нем энергии расходуется на обогрев пространства под кожухом, но это происходит уже после того, как основное воздействие потока было оказано на формирующееся изделие. Поэтому в расчет берется именно мощность источника тепла.

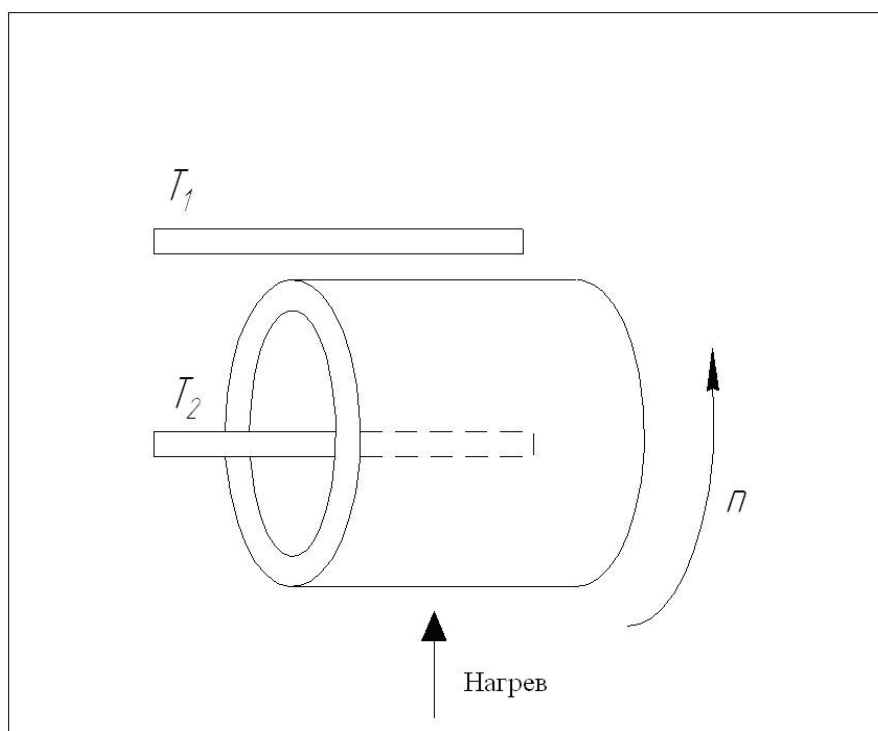


Рис. 2. Температурная схема процесса

Среда формирования полимера не изотропна из-за присутствия наполнителей, поэтому её теплопроводность χ складывается как среднее из теплопроводностей материалов-наполнителей и зависит только от природы наполнителей и радиуса r . Причем вклад теплопроводности каждого из наполнителей учитывается его процентным содержанием в конечном продукте. Геометрические размеры втулки: длина l и высота $h = 2r$. Таким образом, учитывая, что ширина щели теплового потока соответствует длине втулки, температурный градиент направлен от поверхности с большим радиусом к поверхности с меньшим радиусом. Вследствие этого температура среды тоже является в данном случае функцией одной переменной – радиуса r : $T = T(r)$ (рис. 3). Что касается граничных условий, то в данной задаче температурные изменения рассматриваются в пределах среды формообразования полимера, поэтому температура ограничена условиями первого рода: $T(R_1) = T_1$, $T(R_2) = T_2$ [4].

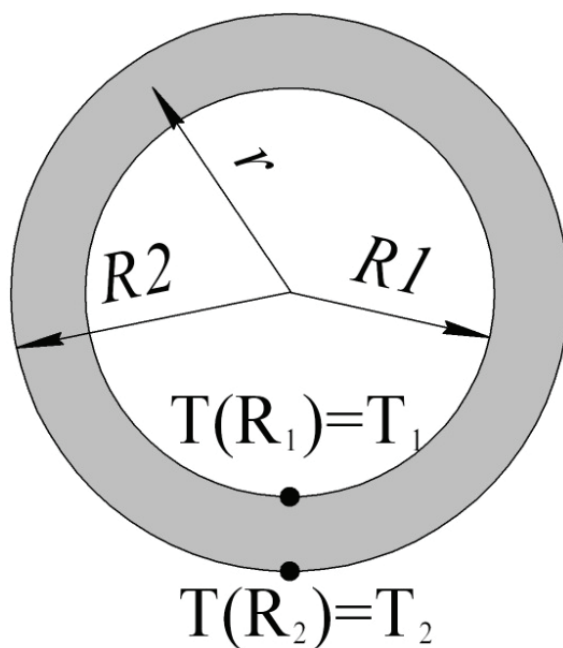


Рис. 3. Расчетная схема

Изучение любого процесса связано с установлением зависимости между величинами, характеризующими данный процесс. Для сложных процессов при установлении зависимостей между величинами удобно воспользоваться методами математической физики, которая рассматривает протекание процесса не во всем изучаемом пространстве, а в элементарном объеме вещества в течение бесконечно малого отрезка времени (рис. 4) [6].

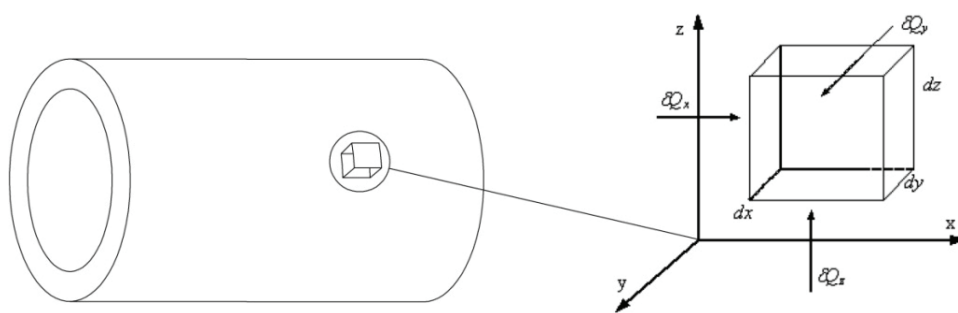


Рис. 4. Переходная схема для определения теплового закона на элементарном уровне



Для решения данной задачи воспользуемся дифференциальным уравнением Фурье для исследуемого температурного поля [4]:

$$j(r) = -\chi(r) \cdot \frac{\partial T(r)}{\partial r}. \quad (1)$$

В этом уравнении учтено, что вектор нормали к изотермической поверхности n параллелен радиус-вектору r . Поэтому производная $\partial T / \partial n$ может быть записана как $\partial T / \partial r$ [4].

Определим зависимость плотности теплового потока j от r . Для этого сначала вычислим тепловой поток q через цилиндр произвольного радиуса r

$$q(r) = \oint_{S(r)} j dS = j(r) S(r). \quad (2)$$

В частности, тепловой поток q_1 через внутреннюю цилиндрическую поверхность радиусом R_1 и тепловой поток q_2 через наружную цилиндрическую поверхность радиусом R_2 равны вследствие того, что происходят от одного и того же источника тепла:

$$q_1 = j(R_1) \cdot S_1, \quad q_2 = j(R_2) \cdot S_2. \quad (3)$$

Поэтому все они равны между и собой равны P :

$$q(r) = q_1 = q_2 = P. \quad (4)$$

С учётом (2), (3) и (4) это равенство можно записать в виде

$$j(r) S = j(R_1) S_1 = j(R_2) S_2 = P. \quad (5)$$

Учитывая, что площадь цилиндра $S = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$, получаем искомую зависимость плотности теплового потока j от радиуса r :

$$j(r) = \frac{C_1}{r}, \quad (6)$$

где C_1 – это константа, определяемая формулой

$$C_1 = j(R_1) \cdot R_1^2 = j(R_2) \cdot R_2^2 = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot h}. \quad (7)$$

Теперь, так как функция $j(r)$ известна, можно рассматривать уравнение (1) как дифференциальное уравнение относительно функции $T(r)$. Решение этого уравнения и даст искомое распределение температур. Подставив в (1) выражение (6), получим следующее дифференциальное уравнение:



$$\frac{C_1}{r} = -\frac{\partial T}{\partial r} \cdot \left(\frac{b}{r}\right) \quad (8)$$

Данное уравнение решается методом разделения переменных:

$$\partial T = -\frac{C_1 \partial r}{b} \quad (9)$$

Интегрирование этого выражения даёт выражение (10):

$$T = -\frac{C_1}{b} \int dr = -\frac{C_1}{b} \cdot r + C_2 \quad (10)$$

Константу интегрирования C_2 можно определить из граничных условий [5]: $T(R_1) = T_1$, $T(R_2) = T_2$. Подстановка этих условий в (10) даёт линейную систему двух уравнений:

$$\begin{cases} T_1 = -\frac{C_1}{b} \cdot R_1 + C_2 \\ T_2 = -\frac{C_1}{b} \cdot R_2 + C_2 \end{cases} \quad (11)$$

Вычитая из первого уравнения системы (11) второе и выразив C_1 , выражение (10) можно записать в виде

$$T(r) = -\frac{T_1 - T_2}{R_2 - R_1} \cdot r + C_2 \quad (12)$$

Из первого граничного условия $T(R_1) = T_1$ получим выражение для константы интегрирования

$$C_2 = T_1 + \frac{T_1 - T_2}{R_2 - R_1} \cdot R_1. \quad (13)$$

Таким образом, обобщая полученные данные, имеем зависимость температуры для условий формирования полимерного материала на установке центробежного формирования СЦФ-4

$$T(r) = \left(T_1 + \frac{T_1 - T_2}{R_2 - R_1} \cdot (r - R_1) \right) + \psi \quad (14)$$

В формуле (14) выражение в скобках характеризует распределение температурного поля в пределах температур: T_1 – внутренней поверхности, T_2 – внешней поверхности, однако, как известно, реакция полимеризации является экзотермической и выделение вследствие этого тепла учитывается коэффициентом ψ , который определяется из теории



Флори-Хаггинса, которая также обуславливает совместимость компонентов в смеси с помощью энергетических параметров [2, 3]:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S, \quad (15)$$

где ΔG – свободная энергия Гиббса,

ΔH – молярная энтальпия реакции,

ΔS – молярная энтропия реакции.

По Флори, энтальпийный и энтропийный вносы, обусловленные локальным парным взаимодействием, могут быть представлены безразмерным параметром ξ_{12} , тогда температурный взнос от экзотермической реакции выражается следующим образом [2, 3]:

$$\psi = \frac{\Delta G}{R \cdot (n_1 \cdot \ln \varphi_1 + n_2 \cdot \ln \varphi_2 + \xi_{12} \cdot n_1 \cdot \varphi_2)}, \quad (16)$$

где n_1, n_2 – мольные доли компонентов смеси,

φ_1, φ_2 – объемные доли компонентов смеси соответственно,

R – газовая постоянная.

Таким образом, относительный вклад энергетических составляющих полимеризации в изменение температурного поля является весомым, однако он возникает только при преодолении температуры стеклования полимера. В этом случае распределение температуры по объему формируемого изделия происходит как с точки зрения физического процесса теплопередачи, так и с точки зрения энергетического взаимодействия веществ при химическом превращении на молекулярном уровне.

Планируются дальнейшие экспериментальные исследования, в ходе которых будут исследованы влияния других важных факторов процесса, оптимизация температурных режимов формирования изделий, а также будет проведено математическое моделирование выявленных зависимостей с целью оптимизации технологических режимов центробежного формирования и улучшения качественных характеристик получаемых изделий.



1. *Промышленные* полимерные композиционные материалы / Под ред. М. Ричардсона: Пер. с англ. под ред. П. Г. Бабаевского. М., 1980.
2. *Бакнелл К. Б.* Ударопрочные пластики: Пер. с англ./Под ред. И. С. Лишанского. Л., 1981.
3. *Flory P. J.* Principles of Polymer Chemistry, Cornet University Press, 1953.
4. *Нащокин В. В.* Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. М., 1980.
5. *Араманович И. Г., Левин В. И.* Уравнения математической физики. М., 1969.
6. *Зельдович Б. И., Мышкис А. Д.* Элементы математической физики. М., 1973.