

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ПЛОСКИХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

© Т. А. Манько, Н. А. Задоя

Фізико-технічний інститут Дніпропетровського національного університету

Запропоновано модель, що дозволяє проаналізувати процес нагрівання плоского склопластику (КТ-11-ТОО+ЛБС-4) із використанням комбінованого способу тверднення, що включає інфрачервоне нагрівання і прискорені електрони. Встановлено, що така модель сприяє призначенню оптимальних параметрів тверднення й збільшенню фізико-механічних властивостей матеріалу.

Для интенсификации процесса формобразования изделий из полимерных композиционных материалов предложено использование в процессе синтеза стеклопластиков радиационного отверждения ускоренными электронами. Поскольку радиационная обработка не обеспечивает стабильные физико-механические характеристики композита на основе связующих поликонденсационного типа из-за плохих условий для удаления летучих веществ, в работе рассмотрен способ комбинированного отверждения стеклопластиков, включающий инфракрасный нагрев и последующее доотверждение ускоренными электронами.

Для решения поставленной задачи использовали стеклопластики теплозащитного назначения КТ-11-ТОО+ЛБС-4. Для реализации ИК-излучения применяли галогенные лампы накаливания КГТ-220-1000. Инфракрасный нагрев осуществляли при температуре 390 К в течение 15 мин. Образцы доотверждали на ускорителе электронов типа ЭлТ-1.5 при дозе облучения 80 Мрад и времени 60 с. Для обеспечения стабильных физико-механических характеристик стеклопластика, а также в связи со сложностью экспериментальных исследований была разработана математическая модель температурных процессов, протекающих при радиационном отверждении связующих.

На рис. 1 показана схема нагрева плоского стеклопластика излучателями инфракрасного нагрева. Плоская пластина 33 нагревается с помощью специальной нагревательной системы. Эта система состоит из основных нагревательных элементов 1-7 и кожуха, служащего для предотвращения потерь тепла. Кожух состоит из верхнего (30) и боковых экранов 31, 32. Влияние кожуха на нагрев цилиндра можно описать посредством введения фиктивных излучателей: верхних 8-14, левых боковых 15-21 и правых боковых 22-28. Все они являются

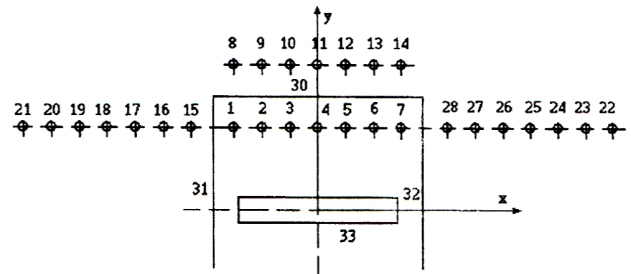


Рис. 1. Схема нагрева плоской пластины излучателями инфракрасного нагрева

отражениями основных нагревателей 1-7. Отражениями второго порядка пренебрегаем.

Введем систему координат, считая начало координат в середине пластины. Считаем, что координаты основных излучателей заданы и равны (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, 7$. Тогда координаты фиктивных верхних, левых и правых излучателей вычисляли соответственно по формулам

$$x_i = x_{i-7}, \quad y_i = 2y_{30} - y_{i-7}, \quad (1)$$

$$i = 8, 9, \dots, 14,$$

$$x_i = 2x_{31} - x_{i-14}, \quad y_i = y_{i-14}, \quad (2)$$

$$i = 15, 16, \dots, 21,$$

$$x_i = 2x_{32} - x_{i-21}, \quad y_i = y_{i-21}, \quad (3)$$

$$i = 22, 23, \dots, 28,$$

где y_{30} , x_{31} , x_{32} — координаты верхнего, левого и правого экранов.

Рассмотрим путь движения нагревающего луча от нагревателя к пластине (рис. 2). Луч начинает

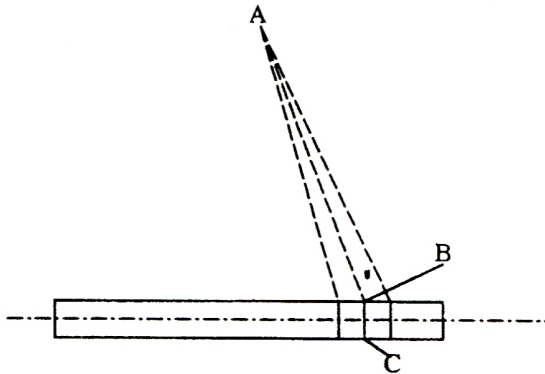


Рис. 2. Путь движения луча от нагревателя к пластине

свое движение в точке А и достигает точки В поверхности пластины. Далее он преломляется на границе раздела между воздухом и композитом и проникает вглубь композита, достигая точки С. Далее будем считать, что луч обрывается в точке С, т. к. при прохождении сквозь твердое вещество энергия луча убывает и становится настолько малой, что рассмотрение дальнейшего хода луча не имеет смысла.

Предполагаем, что отрезок ВС луча перпендикулярен к поверхности пластины.

Поскольку глубина проникновения луча незначительна, допустимо также предположить, что эффекты собирания луча стенками пластины и уменьшения плотности энергии луча вследствие увеличения расстояния от источника на участке ВС также незначительны, и ими можно пренебречь.

Все выше сказанное позволяет записать аналитическое выражение плотности энергии нагревающего луча на различных участках пути движения от нагревателя к пластине. На участках АВ плотность облучения на нормальной к лучу площадке определяется выражением

$$E_i^0 = \frac{E_{TH} r R}{\pi} \left[\frac{a}{R_i^2 + a^2} + \frac{L - a}{R_i^2 + (L - a)^2} + \frac{1}{R_i} \left(\arctg \frac{a}{R_i} + \arctg \frac{L - a}{R_i} \right) \right], \quad (4)$$

где E_{TH} — плотность излучения нити накала, r — радиус излучающей нити, L — длина нити накала, R — коэффициент отражения рефлектора, принимаемый равным единице для основных излучателей, R_i — расстояние от i -го излучателя до рассматриваемой площадки, a — расстояние от нормали к рассматриваемой площадке до начала излучателя вдоль оси z .

Величину R_i на поверхности пластины для i -го излучателя определяли по формуле

$$R_i = \sqrt{(x_i - x_B)^2 + (y_i - y_B)^2}, \quad (5)$$

где x_B, y_B — координаты точки В входа луча в пластину.

При входе в тело направление луча меняется, и его интенсивность уменьшается за счет косоугольного падения. Это можно описать путем умножения исходной плотности на косинус угла между нормалью к поверхности тела и направлением луча. Формула для скалярного произведения позволяет получить следующее выражение:

$$E_i^1 = E_i^0 \frac{y_B - y_i}{\sqrt{(x_B - x_i)^2 + (y_B - y_i)^2}}. \quad (6)$$

После входа в материал тела путь лучей от всех источников нагрева одинаков, поэтому для точек В пластины находим суммарную плотность энергии для всех источников:

$$E^1 = \sum_{i=1}^{28} E_i^1. \quad (7)$$

На участках ВС плотность энергии излучения уменьшается вследствие потерь на нагрев материала:

$$E^{j+1} = E^j \exp(-sp_j), \quad (8)$$

где E^j — плотность излучения на глубине s пластины ($j = 2$), p_j — коэффициенты затухания излучения в пластине ($j = 1$).

Для определения плотности рассеянного тепла на глубине s был взят элементарный объем, верхняя грань которого располагалась на глубине s пластины, нижняя грань — на глубине $s + \Delta s$ рассматриваемого тела, а боковые грани нормальны к поверхности. Через верхнюю грань в рассматриваемый объем поступает энергия, а через нижнюю она уходит. Поток энергии через боковые грани нет.

Уравнение баланса энергии для рассматриваемого объема имеет вид

$$Q^j = E^j \exp(-sp_j) - E^j \exp(-(s + \Delta s)p_j) = E^j \exp(-sp_j) (1 - \exp(-\Delta sp_j)), \quad (9)$$

где j принимает значения 1.

Плотность рассеянной энергии, то есть количество энергии в единице объема, находим, разделив плотность Q^j энергии в луче на длину Δs . Устремляя Δs к нулю, получаем

$$q^j = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{Q^j}{\Delta s} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{E^j \exp(-sp_j) (1 - \exp(-\Delta sp_j))}{\Delta s} = E^j p_j \exp(-sp_j). \quad (10)$$

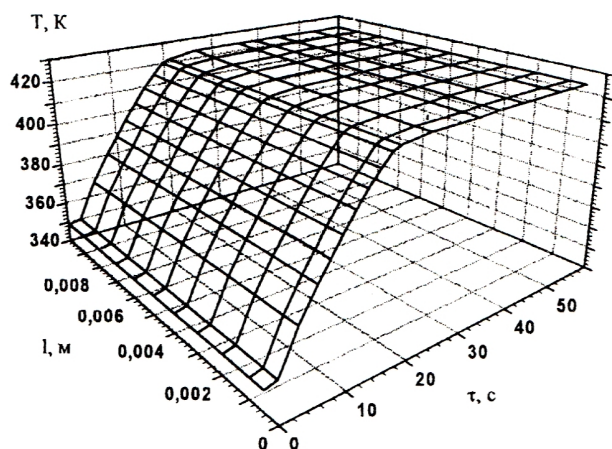


Рис. 3. Отверждение плоского стеклопластика комбинированным способом (ИК + РО)

Эту величину подставим в уравнение теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + q^j. \quad (11)$$

Подтверждением тезисов равномерного распределения температуры, т. е. равномерного прогрева исследуемого материала, являются результаты, приведенные на рис. 3.

Численный расчет проводили для плоского стеклопластика толщиной от 0.5 мм до 10 мм с шагом 0.1 мм при изменении времени через интервал 10 с.

На основании численных расчетов установлено, что при исследовании стеклопластиков температура радиационного отверждения составляет 423 К. При этом обеспечиваются стабильные физико-механические характеристики композита при общем повышении их до 20 %, так комбинированное отверждение обеспечивает прочность 44.6 МПа, конвективный нагрев — 37.2 МПа. Наблюдается сокращение времени отверждения в 2.5 раза.

1. Беляев Н. М., Рядно А. А. Математические методы теплопроводности. — М.: Высш. шк., 1993.—415 с.
2. Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Л.: Энергия, 1976.—352 с.
3. Кноп А., Шейб В. Фенольные смолы и материалы на их основе. — М: Химия, 1983.

HEAT PROCESS SIMULATION OF PLANE FIBER-GLASS-REINFORCED PLASTICS BY A COMBINED METHOD

T. A. Man'ko, N. A. Zadoya

It is offered model, which allows to analyze heat process of plane glass fiber plastics (KT-11-TOA+ ЛБС-4) at combined solidification. Combined solidification including infrared heat and accelerated electron heat. It is established that such model promotes purpose of optimum parameters of solidification and increase of physical-mechanical performances of a material.