
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Т.А. Манько

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО НАГРЕВА В ТЕХНОЛОГИИ ОТВЕРЖДЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

*Днепропетровский национальный университет,
пер. Научный, 13, г. Днепропетровск, 49050, Украина*

Одно из направлений совершенствования процесса изготовления стеклопластиков – применение высокочастотного (ВЧ) нагрева. Особенностью ВЧ метода нагрева, принципиально отличающего его от термического отверждения, является выделение тепловой энергии одновременно во всем объеме нагреваемого материала, что существенно снижает температурные градиенты и способствует уменьшению вероятности возникновения значительных термических напряжений. Для диэлектриков ВЧ нагрев проводят электрическим полем при размещении материала между пластинами конденсатора либо непосредственным облучением электромагнитной волной. Механизм нагрева в обоих случаях одинаков, однако при облучении электромагнитной волной используют более высокие частоты.

Нагрев диэлектриков ВЧ электрическим полем обусловлен смещением связанных зарядов, приводящим к деформации атомов и молекул. Наличие «молекулярного» трения способствует превращению энергии смещения в теплоту, а незначительное количество свободных зарядов образует ток проводимости. Количество тепла, выделяющееся в диэлектрике в единицу времени, пропорционально частоте изменения направления поля [1]. Использование токов высокой частоты перспективно для изделий из стеклопластиков. При ВЧ нагреве изделий из стеклопластиков используют установки непрерывного действия. Они позволяют получать композиты со стабильными свойствами, что особенно важно для конструкционных стеклопластиков.

Проведем оценку мощности, необходимой для ВЧ нагрева образцов стеклопластика в виде плоской пластины и цилиндрической оболочки.

Рассмотрим случай отверждения прямоугольной пластины СТКТ на основе связующего ЛБС-4. При использовании связующего поликонденсационного типа, когда при отверждении выделяются летучие вещества, нецелесообразно сокращать время отверждения из-за ослабления адгезионной прочности между слоями.

Пусть пластина имеет размеры $(30 \times 30 \times 0,6)$ см³. Напряженность электрического поля в материале можно рассчитать по формуле

$$E_m = (P/2\pi\nu E E_0 \operatorname{tg}\delta)^{1/2}, \text{ В/м}, \quad (1)$$

где P – тепловая энергия, выделяемая в материале в единицу времени (удельная мощность), кВт; ν – частота поля, Гц; E – диэлектрическая проницаемость материала; E_0 – диэлектрическая постоянная; δ – угол диэлектрических потерь.

Расчет напряженности E_m производили при следующих значениях входящих в формулу (1) величин: $\nu = 20$ МГц, $E = 4$, $\operatorname{tg}\delta = 0,02$ для жидкого связующего.

Величину удельной мощности определяли из соотношения

$$P = 4,18 \frac{\gamma_c}{\xi_T} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}, \text{ Вт/см}^3,$$

где γ – удельный вес материала, г/см³; c – удельная теплоемкость, кал/т·°С; $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ – скорость нагрева, °С/С; ξ_T – термический КПД процесса нагрева.

При этом использовали известные значения физических параметров СТКТ: $\gamma = 1,68, \text{ г/см}^3$, $c = 0,23 \text{ кал}/(\tau \cdot ^\circ\text{C})$, $\Delta T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, время отверждения $\Delta t = 1800 \text{ }^\circ\text{C}$ и КПД $\xi_T = 0,45$. Расчет мощности, выделяемой в единице объема материала, показал значение $P = 280 \text{ кВт/м}^3$. На основе проведенных вычислений по формуле (1) была рассчитана величина напряженности $E_M = 56,1 \text{ кВ/м}$. При расположении материала между пластинами плоского конденсатора с воздушным зазором принимаем величину зазора $d_3 = 1 \text{ см}$. Схема нагрева приведена на рис. 1.

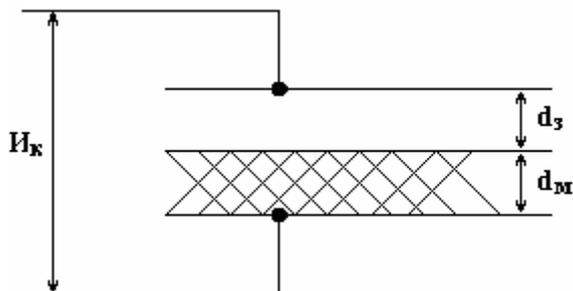


Рис. 1 Схема нагрева прямоугольной пластины стеклопластика в конденсаторе с воздушным зазором

Введем обозначения: E_M – напряженность электрического поля в материале; E_3 – напряженность электрического поля в воздушном зазоре; U_M – напряжение в материале; U_3 – напряжение в зазоре; U_K – напряжение, приложенное к пластинам конденсатора.

Используя известные значения величин E_M, E_3, ϵ_M , определяем: $E_3 = \epsilon_M \cdot E_M = 2244 \text{ В/см}$; $U_M = E_M \cdot d_M = 336,6 \text{ В}$; $U_3 = E_3 \cdot d_3 = 2244 \text{ В}$; $U_K = U_M + U_3 = 2,58 \text{ кВ}$.

Емкость плоского конденсатора выражается формулой

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (2)$$

где S – площадь электродов конденсатора; d – расстояние между электродами; ϵ – средняя диэлектрическая проницаемость слоистого материала, заполнившего рабочее пространство конденсатора.

Для слоистого диэлектрика (если считать воздух и стеклопластик слоями одного неоднородного материала) среднюю диэлектрическую проницаемость можно вычислить по формуле [2]:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_3 \cdot \epsilon_M \cdot (d_3 + d_M)}{\epsilon_3 \cdot d_M + \epsilon_M \cdot d_3}. \quad (3)$$

Учитывая рассчитанные значения $S = 0,09 \text{ м}^2$ и $\epsilon = 1,4$, получаем величину $C = 69,6 \text{ пФ}$.

Мощность потерь в конденсаторе определяем по формуле [3]:

$$P_a = P_p \cdot \text{tg} \delta, \quad (4)$$

где $P_p = I_K^2 \cdot \omega c$ – реактивная мощность конденсаторов; ω – циклическая частота ($\omega = 2\pi \nu$).

Расчет, проведенный по формуле (4), приводит к значению $P_a = 1,166 \text{ кВт}$. Мощность, необходимая для нагрева стеклопластика в переменном поле токов ВЧ плоского конденсатора, составляет $\sim 1,17 \text{ кВт}$. Сравним полученное значение P_a с мощностью экспериментальной установки для отверждения пластин стеклопластика инфракрасным нагревом. Необходимая мощность источников инфракрасного нагрева галогенных ламп накаливания составляет 3 кВт .

При отверждении цилиндрической оболочки по схеме, приведенной на рис. 2, постоянную мощность, подводимую к конденсатору, рассчитывали при следующих исходных данных: $\Delta t = 30 \text{ мин}$; $\epsilon = 4$; $\text{tg} \delta = 0,02$; $\nu = 20 \text{ мГц}$; $d_3 = 5 \text{ мм}$; $D_1 = 86 \text{ мм}$; $D_2 = 67 \text{ мм}$.

По результатам расчетов были определены: удельная мощность $P = 2060$ кВт/м; напряженность электрического поля в материале $E_m = 1,5$; напряжение на электродах конденсатора $U = 4,5$ кВ; емкость конденсатора для отверждения оболочки длиной 30 см $C = 30$ пФ; мощность, необходимая для отверждения оболочки $P_a = 1,52$ кВт.

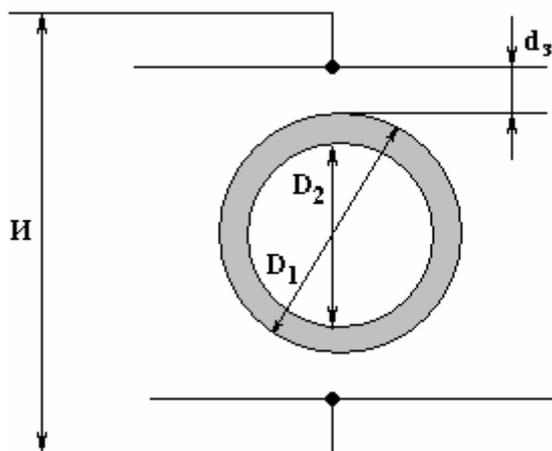


Рис. 2. Схема нагрева цилиндрической стеклопластиковой оболочки в конденсаторе с воздушным зазором

Для сравнения была рассчитана мощность P' , необходимая для послойного отверждения цилиндрической оболочки, в процессе намотки инфракрасным нагревом при облучении тремя галогенными лампами накаливания. Вычисления показали значение величины $P' = 1,62$ кВт.

Проведенные одиночные расчеты показывают, что процессы отверждения стеклопластика с применением нагрева током высокой частоты и инфракрасным облучением требуют подвода одинаковой по порядку величины мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брицын Н.Л. Нагрев в электрическом поле высокой частоты. М.-Л.: Машиностроение, 1985. 52 с.
2. Княжевская Г.С., Фирсова М.Г. Высокочастотный нагрев диэлектрических материалов. Л.: Машиностроение, 1988. 71 с.
3. Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. Приемно-усилительные устройства. Киев: Наукова думка, 1981. 671 с.

Поступила 06.04.06

Summary

In the paper power indispensable for a high-frequency heating are calculated for glass fibre plastics that have a form of plates and cylindrical shells.