
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Т. А. Манько

ОТВЕРЖДЕНИЕ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

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

Использование инфракрасного (ИК) излучения значительно сокращает процесс отверждения полимерного материала по сравнению с его термоотверждением в печах [1]. В качестве источников излучения применяют как «светлые» (коротковолновые), так и «темные» (длинноволновые) генераторы. Последние особенно эффективны для обработки стеклопластиков вследствие значительного поглощения ИК лучей в длинноволновом диапазоне спектра материала [2]. Среди «темных» излучателей преимущественными являются трубчатые электронагреватели (ТЭН), отличающиеся простотой конструкции, надежностью эксплуатации, возможностью обеспечения «мягких» режимов обработки [3].

Отверждение стеклопластиков проводили в экспериментальной установке, в которой генератором являлась система ТЭН. При расчете установки определяли мощность излучателей, их размеры, количество и расположение, основным требованием выдвигалось обеспечение равномерности облучения поверхности материала в процессе нагрева до заданной температуры. При решении задачи создания равномерной плотности излучения нагревателей экспериментально изучали поля излучения отдельных источников и их групп. Расчет установки проводили с использованием дифференциального уравнения теплового баланса [4]. Так как температура излучающих поверхностей не ниже 670 К, а температура нагреваемого материала не превышает 430 К, уравнение теплового баланса принимает вид уравнения теплообмена излучением между двумя серыми телами произвольной формы, представляющими собой замкнутую систему:

$$Q = C_{np}(T_1^4 - T_2^4)H. \quad (1)$$

Если пренебречь влиянием обратного отражения от нагреваемого материала, формула (1) преобразуется в (2):

$$Q = C_{np}T_1^4H, \quad (2)$$

где Q – количество тепла, передаваемого излучением от тела 1 к телу 2 в результате взаимного излучения; T_1 и T_2 – абсолютные температуры поверхностей тела 1 и тела 2; $H = \varphi_{1-2}f_1 = \varphi_{2-1}f_2$ – взаимная излучающая поверхность тел 1 и 2; f_1 и f_2 – средние коэффициенты облученности тела 1 на тело 2 и тела 2 на тело 1;

$$H = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos \Psi_1 \cos \Psi_2}{\Pi r^2} dF_2, \quad (3)$$

где Ψ_1 и Ψ_2 – углы, образованные направлением излучения с нормальными к площадкам dF_1 и dF_2 ; r – расстояние между площадками; H , φ_{1-2} и φ_{2-1} – геометрические параметры, зависящие от формы и взаимного расположения тел; C_{np} – приведенный коэффициент излучения; $C_{np} = 4,9\varepsilon_{np}$;

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + (1/\varepsilon_1 - 1)\varphi_{1-2} + (1/\varepsilon_2 - 1)\varphi_{2-1}}, \quad (4)$$

где ε_1 и ε_2 – степень черноты тел 1 и 2.

Наиболее просто задача определения величины взаимной излучающей поверхности H и соответствующих коэффициентов облученности тела φ_{1-2} и φ_{2-1} решается с помощью разработанной Г.Л. Поляком алгебры однородных потоков [5].

Для случая взаимного расположения излучающих поверхностей, имеющих форму неограниченной плоскости и однородного ряда труб, схема которого приведена на рис. 1.

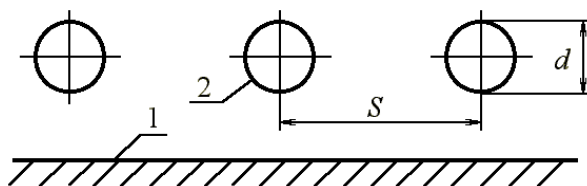


Рис. 1. Схема расположения излучающих поверхностей.

$$\begin{aligned} \varphi_{1-2} &= 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{S}\right)^2} + \frac{d}{S} \arctg \sqrt{\left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1} ; \\ \varphi_{2-1} &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{S}{d} - \sqrt{\left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1} + \arctg \sqrt{\left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1} \right] ; \\ H &= \varphi_{1-2} \cdot S = \varphi_{2-1} \cdot \pi \alpha , \end{aligned} \quad (5)$$

где H отнесено к 1 м длины трубы.

Значения входящих в формулы величин определяли опытным путем при изучении полей излучения отдельных источников и их групп.

Измерение температурных полей, формируемых различными источниками, осуществляли термометрами «хромель–алюмель». При проведении измерений под излучателями располагали координатную сетку с квадратом (2x2) см.

На рис. 2 представлены поля излучения одиночного трубчатого электронагревателя, создаваемые на различных расстояниях l от него. Кривые имеют колоколообразный вид с вершинами на оси нагревателя. С увеличением расстояния от ТЭН до облучаемой поверхности наклон кривых уменьшается.

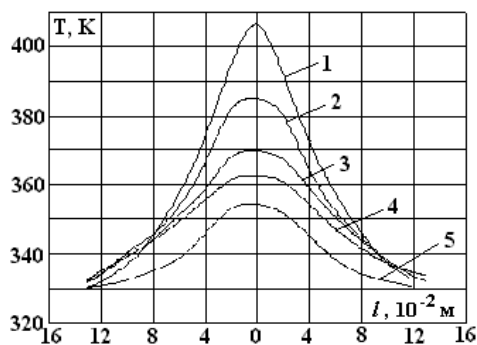


Рис. 2. Поперечное сечение поля температур одного ТЭН ($U = 100\text{В}$; $h = \text{const}$).

Применение рефлектора позволяет увеличить значения величины облученности E и создать более равномерное поле излучения. На рис. 3 изображено поле излучения системы ТЭН–экран. В центре кривых под осью нагревателя наблюдается уменьшение величины интенсивности излучения, что вызвано экранирующим действием ТЭН, не пропускающего лучи, отраженные от рефлектора. Из рис. 3 следует, что изменение расстояния от экрана до ТЭН позволяет повысить равномерность создаваемого поля излучения.

Более равномерное поле облучения формирует группа излучателей, при этом значение величины облученности, созданной совместным излучающим действием нагревателей, значительно возрастает.

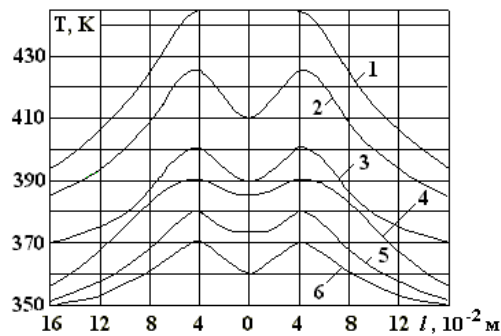


Рис. 3. Поперечное сечение поля температур одного ТЭН с плоским отражателем ($U = 100В$; $h = const$).

Экспериментально путем изменения мощности излучателей за счет регулировки напряжения питания U , расстояния от ТЭН до облучаемой поверхности h , расстояния от отражателя до ТЭН h_1 и расстояния между ТЭН 1 были выбраны значения U , h , h_1 и l , позволяющие обеспечить близкое к равномерному поле температур необходимой величины $T = 430$ К. При этом по оси ТЭН величина E практически одинакова в зоне отверждаемого материала.

Подставляя в формулы (5), (4) и (2) полученные из проведенных экспериментов размеры ТЭН, их количество, расстояние между нагревателями, температуру поверхности, размеры облучаемого образца, спектральные характеристики материала образца и ТЭН, проводили тепловой расчет нагревателей. Результаты теплового расчета подтвердили, что выбранные в качестве нагревателей ТЭН обеспечивают необходимую мощность установки.

По результатам проведенных экспериментов и расчетов была изготовлена установка, содержащая систему ТЭН, медный полированный отражатель для уменьшения тепловых потерь в пространство и создания направленного лучистого потока на облучаемую поверхность. В установке предусмотрено перемещение нагревателей относительно поверхности облучения и отражателя относительно нагревателей.

В описанной установке проводили отверждение образцов стеклопластика с применением ИК облучения. Кинетика нагрева трубчатых электронагревателей изображена на рис. 4. В качестве критерия оценки качества отверждения образцов использовали прочность на разрыв. Образцы изготавливали из лент предварительно пропитанной бакелитовым лаком кремнеземной ткани. Заготовки образцов, представляющие собой наложенные “внахлест” полоски препрега размером (140x20) мм с шириной перекрытия 25 мм, предварительно опрессовывали при давлении 0,5–0,7 МПа и температуре 430 ± 5 К в течение 30 минут. Сформованные заготовки подвергали ИК нагреву при температуре 430 К, используя ТЭН.

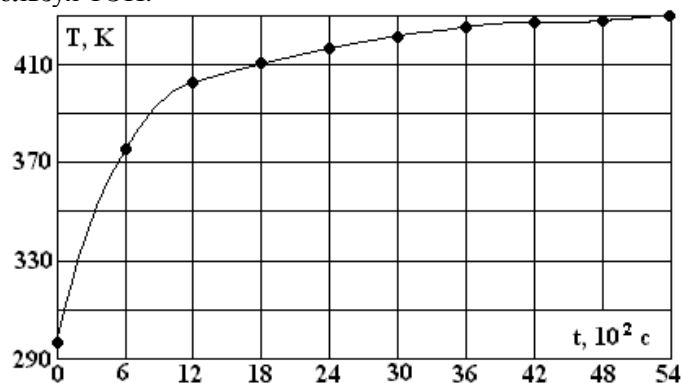


Рис. 4. Кинетика нагрева при облучении двух ТЭН ($h_1 = 2$ см; $h = 2,5$ см; $l = 14$ см).

В таблице приведены средние значения усилий разрыва P_p при механических испытаниях образцов, изготовленных по разным режимам отверждения.

Сравнительная оценка эффективности применения ИК излучения трубчатых электронагревателей и термоотверждения показывает перспективность применения для отверждения стеклопластиков инфракрасного нагрева. Экспериментально подобранные режимы обработки образцов обеспечивают наиболее высокие физико-механические характеристики материала по сравнению со

свойствами, полученными конвективным нагревом при значительном сокращении времени отверждения (6~7 раз).

Разрывная прочность образцов стеклопластика

Вид отверждения	Режим отверждения, К/мин	R _p , МПа	Количество образцов
ИК излучение ТЭН	(420–430)/40	12,7	12
	подъем (290–430/85)	11,4	12
Термоотверждение	подъем (290–350/2 ч)	10,4	12
	подъем (350–430/6 ч) 430/1 ч		

Таким образом, разработанный физический метод воздействия инфракрасного облучения на стеклопластики можно считать эффективным технологическим средством повышения физико-механических свойств композитов при существенной интенсификации процессов отверждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зворыкин Д.Б., Прохоров Ю.И. Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности. М., 1980.
2. Инфракрасные спектры поглощения полимеров и вспомогательных веществ / Под ред. Чулановского. Л., Химия, 1969.
3. Гинзбург А.С., Ляховицкий Б.М. Генераторы инфракрасного излучения. М., 1971.
4. Гинзбург А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. М., 1966.
5. Поляк Г.Л. Теория лучистого теплообмена. М., 1939.

Поступила 02.04.2001

Summary

The prospectiveness of the use of infrared radiation of pipe electric heaters for hardening of glass-plastics has been shown. Experimentally selected modes provide high physical and mechanical properties of the materials and substantially intensify the process of their manufacturing.
