

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

В. О. ВАШУНИ, Я. И. НИКОЛАПЧИК,  
С. Д. ТРИФОНОВ, Л. Д. ТРИФОНОВА

К ВОПРОСУ О СОГЛАСОВАНИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ СО  
СПЕКТРАМИ ПОГЛОЩЕНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ В  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ СУШКИ  
ОДНОНАПРАВЛЕННОЙ СТЕКЛОЛЕНТЫ

Инфракрасный метод нагрева и сушки стеклопластиков (ИК-нагрев), как одно из средств интенсификации технологических процессов, получил широкое распространение в промышленности, взамен нагрева в конвективных печах. Эффективность этого метода определяется наличием у стеклопластиков спектральных областей проникновения излучения в глубину вещества, что позволяет получить более или менее равномерное тепловыделение во всем объеме материала. Процесс сушки при ИК-нагреве ускоряется за счет увеличения тепловой нагрузки путем уменьшения градиента температуры внутри слоя вещества при заданной температуре его поверхности, или путем увеличения температуры поверхности при сохранении заданного температурного градиента внутри слоя.

Для большинства технологических процессов нагрева и сушки веществ выбор ИК-излучателей производится путем сравнения спектров поглощения и пропускания веществ со спектрами испускания ИК-излучателей. Однако, применительно к нагреву и сушке некоторых стеклопластиковых материалов, в том числе и однонаправленной стеклоленты, критерии эффективности применения и выбора ИК-излучателей разработаны еще недостаточно.

Считается, например, что оптимальным вариантом сушки стеклопластиков методом ИК-нагрева является использование излучателей при такой температуре, чтобы максимум их излучения приходился на полосы интенсивного поглощения связующего [1]. Однозначность такого решения вызывает сомнения, поскольку в этом случае излучение поглощается только поверхностным слоем стеклопластика и реакция полимеризации проходит преимущественно на поверхности вещества.

Применение ИК-излучателей, максимум спектральной интенсивности плотности излучения которых приходится на полосы интенсивного поглощения связующих, не оправдывает себя и в случаях, когда по технологическому процессу требуется удаление растворителей из вещества без нагрева или при незначительном нагреве остальных компонентов ве-

щества. Такая задача стоит, например, при изготовлении однонаправленной незаполимеризованной стеклотенты, основным требованием к которой является удаление растворителя, представляющего собой смесь спирта, ацетона и диметилформамида; процессы объемной полимеризации при этом должны быть полностью исключены.

Исходя из сказанного, представляется рациональным, для целей удаления летучих веществ, использовать селективные ИК-излучатели, максимумы спектральной интенсивности плотности излучения которых лежат в диапазоне длин волн, совпадающем с полосой поглощения растворителей и соответственно с полосой пропускания связующего.

На рис. 1 представлены полученные экспериментальным путем спектры полусферического пропускания однонаправленной стеклотенты в диапазоне длин волн от 0,4 до 7,0 мкм (кривая 1), а также спектры пропускания смеси растворителей в указанном диапазоне длин волн при толщине слоя растворителя  $d=0,125$  мм (кривая 2). Из-за отсутствия серийных приборов, позволяющих учитывать рассеяние при измерении нормального пропускания, полусферические коэффициенты пропускания и отражения незаполимеризованной ленты измерялись на приставке к спектрофотометрам ИКС-14 и ИКС-12, а спектры нормального пропускания смеси растворителей и связующего—на спектрофотометрах ИКС-14 и UR-20. В качестве связующего исследовались термореактивные составы на базе эпоксидных смол ЭД-5 и ЭД-6.

Из рис. 1 (кривая 1) следует, что небольшие полосы поглощения незаполимеризованной стеклотенты (связующее плюс стекловолокно) расположены в области 1,4; 1,7; 2,3 и 2,5 мкм. В диапазоне длин волн  $2,75 \text{ мкм} < \lambda < 3,6 \text{ мкм}$  и  $\lambda > 5,5 \text{ мкм}$  расположены полосы интенсивного поглощения. Из того же рис. 1 (кривая 2) видно, что максимумы полос интенсивного поглощения смеси растворителей расположены в области 2,27 и 2,43 мкм и в диапазоне от 2,78 до 4,0 мкм. Казалось бы, из-за совпадения полос интенсивного поглощения стеклотенты и растворителей в диапазоне длин волн от 2,75 до 4,0 мкм наиболее целесообразным является применение селективных ИК-излучателей в тех областях, где коэффициент поглощения смеси растворителей превышает коэффициент поглощения стеклотенты, например, при  $\lambda = 2,27; 2,43$  или 4,0 мкм, а также в диапазоне от 0,8 до 1,8 мкм. Однако в промышленности отсутствуют селективные излучатели, работающие в крайне узком диапазоне длин волн, а серийные ИК-излучатели практически являются излучателями с непрерывным спектром излучения, идентичным спектру излучения серых тел при той же температуре, что и ИК-излучатели. Положение максимума спектральной интенсивности плотности излучения таких излучателей определяется законом Вина:

$$\lambda_{\max} = \frac{2896}{T}$$

где  $\lambda_{\max}$  — длина волны излучения, соответствующая максимуму спектральной интенсивности плотности излучения;

$T$  — температура излучателя в °К.

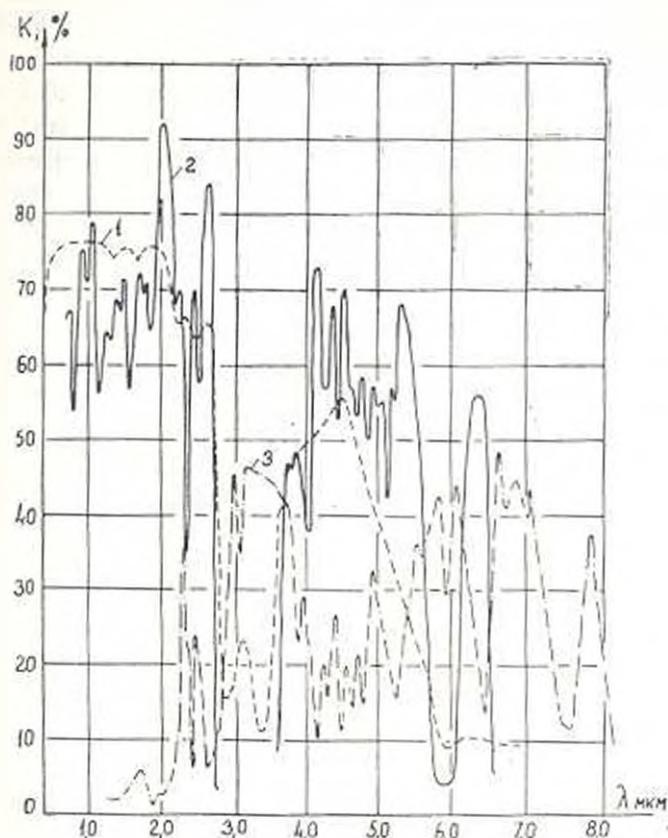


Рис. 1. Спектры полусферического пропускания однонаправленной стеклоленты (кривая 1) и смеси растворителей на основе эпоксидных смол (кривая 2) и спектр поглощения диметилформамида (кривая 3)

Для серийно выпускаемых промышленностью излучателей с температурой  $600^{\circ}\text{C}$  ( $873^{\circ}\text{K}$ ),  $1000^{\circ}\text{C}$  ( $1273^{\circ}\text{K}$ ) и  $2000^{\circ}\text{C}$  ( $2273^{\circ}\text{K}$ ) максимум излучательной способности приходится соответственно на длины волн  $\lambda_{\text{max}} = 3,32; 2,28$  и  $1,28$  мкм. Сопоставление этих значений с зависимостями коэффициентов поглощения незаполимеризованной стеклоленты и смеси растворителей от длины волны (см. рис. 1) позволяет прийти к заключению, что спектр излучения широко применяемых в настоящее время низкотемпературных излучателей (ТЭН'ов с  $T = 600^{\circ}\text{C}$ ) плохо согласуется со спектром поглощения ленты и смеси растворителей. Несмотря на то, что максимум излучательной способности ТЭН'ов приходится на длину волны излучения  $\lambda_{\text{max}} = 3,32$  мкм, т. е. на область, где коэффициент поглощения смеси растворителей превышает коэффициент поглощения незаполимеризованной стеклоленты, только 30% поглощенной энергии излучения приходится на эту область, а большая часть энергии излучения (до 70%) расходуется преимущественно на нагрев стеклоленты, а не растворителя (главным образом в диапазоне длин волн от 4,0 до 6,5 мкм). Данное обстоятельство не соответствует основной цели применения ИК-нагревателей.

С другой стороны, исходя из зависимостей, приведенных на рис. 1, для сушки ленты целесообразно использование и светлых ИК-излучателей с температурой  $T=2000^{\circ}\text{C}$ , у которых  $\lambda_{\text{max}}=1,28$  мкм. Спектр излучения таких излучателей хорошо согласуется со спектрами поглощения ленты и растворителей в диапазоне длин волн от 0,63 до 2,77 мкм. В этом диапазоне длин волн коэффициент поглощения растворителя значительно превышает коэффициент поглощения связующего, и, следовательно, имеет место селективное воздействие излучения на стеклопластик. Однако в диапазоне длин волн от 0,63 до 2,06 мкм, на который приходится 70% энергии излучения, коэффициент поглощения растворителя не превышает 0,5%, в остальном диапазоне длин волн его максимальное значение не превышает 25%. Поэтому эффективность нагрева и сушки однонаправленной стеклоленты с помощью ИК-излучателей с температурой  $T=2000^{\circ}\text{C}$  невелика.

Значительно больший эффект дает применение светлых ИК-излучателей с температурой  $T=1000-1100^{\circ}\text{C}$ . Несмотря на некоторое уменьшение доли лучистой энергии, приходящейся на растворитель, и увеличение энергии, поглощаемой стеклолентой, эти излучатели, по сравнению с высокотемпературными, позволяют увеличить теплоотдачу в стеклопластик примерно в пять раз. За счет кратковременности технологического процесса сушки, имеющей место при ИК-нагреве светлыми излучателями, такое увеличение тепловой нагрузки не приводит к образованию трехмерных полимеров, а образование линейных полимеров не ухудшает качества ленты.

В пользу применения ИК-излучателей с температурой  $1000-1100^{\circ}\text{C}$  говорит еще один факт. Использование в качестве растворителей смеси ацетона, спирта и диметилформамида приводит к тому, что удаление всех названных компонентов происходит поэтапно. Спирт и ацетон легко улетучиваются уже при комнатной температуре, в то время как для удаления диметилформамида необходимо затратить значительное количество тепла. Следовательно, выбор температуры излучателя необходимо осуществлять в первую очередь с учетом спектральных коэффициентов поглощения диметилформамида.

На рис. 1 (кривая 3) приведен спектр поглощения диметилформамида в диапазоне длин волн от 0,75 до 8,0 мкм для толщины слоя 0,07 м. Выбор такой толщины объясняется долей диметилформамида в смеси растворителей для термореактивных связующих на базе эпоксидных смол. Полосы поглощения диметилформамида соответствуют длинам волн  $\lambda=1,7; 2,3; 2,45$  мкм и области от 2,8 до 4,0 мкм. Если принять во внимание, что максимальной излучательной способности ИК-нагревателей с температурой  $T=1000^{\circ}\text{C}$  соответствует длина волны  $\lambda_{\text{max}}=2,28$  мкм, а с температурой  $T=600^{\circ}\text{C}$  —  $\lambda_{\text{max}}=3,32$  мкм, и учесть, что только 25% энергии излучения нагревателей сосредоточено в коротковолновой области спектра ( $0 < \lambda < \lambda_{\text{max}}$ ), то предпочтение следует отдать излучателям с температурой  $T=1000-1100^{\circ}\text{C}$ , спектр излучения которых практически полностью перекрывает всю полосу интенсивного поглощения диметилформамида. Для излучателей с температурой  $T=600^{\circ}\text{C}$  большая

часть энергии излучения (свыше 60%) приходится на длины волн больше 4,0 мкм, где коэффициент поглощения диметилформамида сравнительно невелик, а поглощательная способность ленты превышает поглощательную способность растворителя.

Для иллюстрации на рисунках 2 и 3 представлены зависимости поглощательной способности смеси растворителей и связующих на базе эпоксидных смол от длины волны излучения, а также спектры излучения нагревателей соответственно при температурах  $T=2000^{\circ}\text{C}$  и  $T=600^{\circ}\text{C}$ .

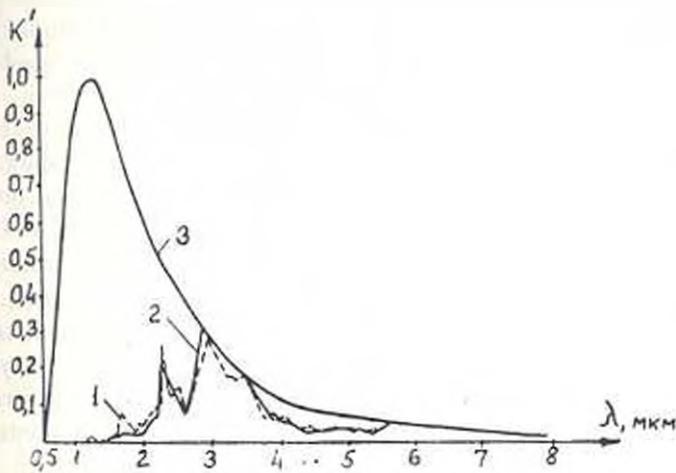


Рис. 2. Зависимость поглощательной способности смеси растворителей (кривая 1) и связующего (кривая 2) и спектр излучения нагревателей при температуре  $2000^{\circ}\text{C}$

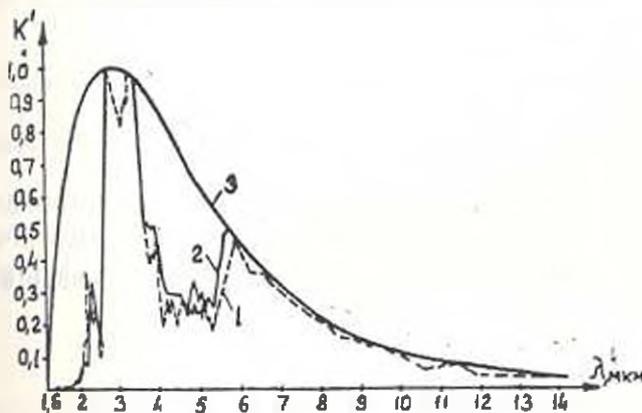


Рис. 3. Зависимость поглощательной способности смеси растворителей (кривая 1) и связующего (кривая 2) и спектр излучения нагревателей при температуре  $600^{\circ}\text{C}$

Из рис. 2 видно, что при использовании светлых излучателей с температурой  $T=2000^\circ\text{C}$  доля энергии излучения, приходящаяся на участки поглощения растворителя и связующего, невелика. Применение же низкотемпературных излучателей ( $T=600^\circ\text{C}$ ) не обеспечивает избирательного удаления растворителя, поскольку, в соответствии с рис. 3, кривая зависимости коэффициента поглощения растворителя практически во всем диапазоне длин волны ( $\lambda > 2,8 \text{ мкм}$ ) расположена ниже кривой, характеризующей поглощательную способность связующего и незаполимеризованной ленты в целом.

Количественное сравнение поглощательной способности смеси растворителей и незаполимеризованной стеклорезки было получено расчетным путем на основе экспериментальных данных, приведенных на рисунках 1, 2 и 3. Определялись усредненные значения коэффициентов поглощения по участкам спектра, на которые приходится по десять процентов энергии излучения при температурах нагревателей  $T=2000; 1050; 600^\circ\text{C}$ . В расчетах было учтено, что излучение вольфрамовой спирали нагревателей с длиной волны свыше  $3 \text{ мкм}$  полностью поглощается кварцевой оболочкой нагревателя, и в этом диапазоне длин волны на связующее будет попадать перенезлучение кварцевой оболочки при температуре, значительно меньшей, чем температура спирали.

Рассчитанные указанным образом средние коэффициенты поглощения смеси растворителей во всем диапазоне длин волны излучения для нагревателей при температурах  $T=600; 1050; 2000^\circ\text{C}$  соответственно равны 4,30; 21,03; 28,92, а средние коэффициенты поглощения связующих для тех же значений температур нагревателей во всем диапазоне длин волны соответственно равны 2,79; 21,03 и 33,30.

Таким образом, на основании сравнения спектров излучения инфракрасных нагревателей со спектрами поглощения смеси растворителей, связующего и ленты в целом следует, что для ИК-нагрева и сушки однонаправленной незаполимеризованной стеклорезки наиболее оптимальным является использование светлых ИК-излучателей при температурах  $1000 \text{--} 1100^\circ\text{C}$ .

Московский станкоинструментальный институт

Поступило 27.V.1975.

Վ. Օ. ՎԱՆՈՒՆԻ, ՅԱ. Ի. ՆԻՈՒԱՅՐԻ, Ս. Գ. ՏՐԻՅՈՒՈՎ, Լ. Գ. ՏՐԻՅՈՒՈՎԱ

ՄԻԱՌԻՂՂՈՐԳՎԱՄ ԱՊԱԿԵԺԱՊԱՎԵՆԻ ԶՈՐԱՅՄԱՆ ՏԵՆՆՈՂՈԳԻՈՒԿԱՆ ՊՐՈՑԵՍՍՈՒՄ ԻՆՖՐԱԿԱՐՄԻՐ ՃԱԹԱԳՈՅԹԻԶԻ ՍՊԵԿՏՐԱԿ ԲՆՈՒԹԱԳՐԵՐՆ ԱՊԱԿԵՊԼԱՍՏԻՈՆԻԻ ԿԼԱՆՄԱՆ ՍՊԵԿՏՐՆԵՐԻ ՀԵՏ ՀԱՄԱԶԵՑՆԵՑՆԵՆՆՈՒ ՀԱՐՅԻ ՇՈՒՂԻ:

Ա մ փ ո փ ո ռ փ

Հոդվածում բերված են էպոքսիդային խեժերի հիման վրա կապակցող լուծույթների, լուծիչների խառնուրդի և փաթաթման մեթոդով թաղանթային շինվածքներ պատրաստելու համար կիրառվող շարժիմների գաղափարը և պարզված ապակեժապակեի քաղցրուժան ու կրանժան սպեկտրների փորձա-

բարական հետադասութիւնների արդյունքները: Ստացված սպեկտրներն օգտագործելով, հիմնավորված է միաուղղորդված ազակեմապալենի ընտրա-  
րար տարացման և շտրացման համար 1000—1100°C ճառագայթման ջերմաս-  
տիճան ունեցող լուսային ինֆրակարմիր ճառագայթիչների ընտրութիւնը:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Моисеев Л. К. и др. Сущка стеклопластиков ИК-излучением. «Пластмассы», 1969, № 8.
2. Пакен А. М. Эпоксидные соединения и эпоксидные смолы. Изд. «Химия», Л., 1962.
3. Козырев Б. П., Вершинин О. Е. «Оптика и спектроскопия», 1959, т. 6, вып. 4.