

8. EIA/JEDEC JESD51-1 standard. IC Thermal Measurement Method — Electrical Test Method (Single Semiconductor Device) [Электрон. ресурс]. <http://www.jedec.org/download/search/jesd51-1.pdf> (дата обращения: 25.05.2015).

9. Poppe A., Székely V. Dynamic Temperature measurements: tools providing a look into package and mount structures // Electronics Cooling. 2002. № 8. P. 10—19.

10. Вяхирев В. Б. Измерение тепловых характеристик полупроводниковых электронных компонентов // Технологии в электронной промышленности. 2013. № 3. С. 90—92.

11. Сергеев В. А., Смирнов В. И., Гавриков А. А., Фролов И. В. Измерение теплового импеданса мощных светодиодов с применением широтно-импульсной модуляции мощности // Известия вузов. Электроника. 2012. № 3. С. 64—68.

12. Сергеев В. А., Смирнов В. И., Гавриков А. А., Конторович М. Л. Автоматизированный измеритель теплового импеданса полупроводниковых диодов с широтно-импульсной модуляцией греющей мощности // Промышленные АСУ и контроллеры. 2010. № 3. С. 47—49.

13. Сергеев В. А., Фролов И. В. Алгоритм идентификации параметров тепловых схем полупроводниковых приборов по частотным зависимостям теплового импеданса // Автоматизация процессов управления. 2014. № 4. С. 53—57.

14. Бобылёв Д. А., Боровских Л. П. Подход к построению универсальных преобразователей параметров многоэлементных двухполюсников // Измерительная техника. 2014. № 12. С. 47—51.

15. Кнеллер В. Ю., Боровских Л. П. Определение параметров многоэлементных двухполюсников. М.: Энергоатомиздат, 1986.

16. Сергеев В. А., Фролов И. В. Алгоритм определения набора оптимальных частот тестового сигнала при измерении параметров многоэлементных двухполюсников // Автоматизация процессов управления. 2014. № 1. С. 31—37.

17. Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ.; под ред. А. Э. Юновича. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.

Дата принятия: 06.11.2015.

621.385.6.6

Измерения температуры стенок композитных труб при термообработке в СВЧ-установках типа бегущей волны

В. Н. НЕФЁДОВ, А. В. МАМОНТОВ, В. П. СИМОНОВ

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия, e-mail: 6034348@mail.ru, a.mamontov@hse.ru

Предложен метод построения микроволновых установок, формирующих равномерное распределение температуры по поперечному сечению диэлектрических труб. Рассмотрен способ расчёта распределения температуры по толщине труб из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: СВЧ-установка, распределение температуры, диэлектрический материал, волновод, замедляющая система, источник СВЧ-энергии.

The proposed method of constructing microwave devices, forming a uniform temperature distribution over the cross section of the dielectric pipe and the method of calculation of the temperature distribution along the thickness of pipes made of composite materials.

Key words: microwave device, temperature distribution, dielectric material, waveguide, slow-wave system, microwave power source.

В настоящее время трубы из полимерных композиционных материалов широко применяют для систем водоснабжения в дорожном, коммунальном и сельском хозяйстве. Такие трубы имеют высокую химическую стойкость, низкую теплопроводность, механическую прочность, экологичность, что позволяет использовать их для трубопроводов питьевой воды. Традиционные методы отверждения труб связаны как с их нагревом до заданной температуры посредством электрических нагревателей — тэнов, так и поддержанием температуры материала трубы в течение времени, необходимого до отверждения материала с учётом теплоотдачи в окружающую среду.

При изготовлении труб из композитных материалов на основе стеклянных, базальтовых или углеродных волокон используют термоотверждаемое полимерное связующее с низким коэффициентом теплопроводности. Поэтому при технологическом нагреве изделий внешним источником тепловой энергии по поперечному сечению трубы возникает неоднородное распределение температуры. Это приводит к возникновению градиента скорости химической реакции при отверждении, появлению внутренних напряжений и, следовательно, ухудшению физико-механических характеристик изделий. Кроме того, длительное воздействие высоких температур вызывает нарушение однородности и деструкцию поверхностных слоёв диэлектрических труб.

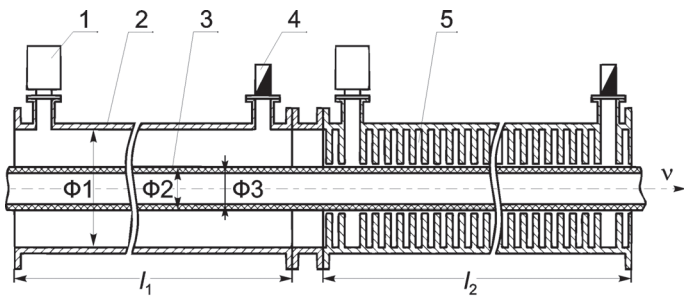


Рис. 1. Микроволновая установка для термообработки диэлектрических труб:

1 — источник СВЧ-энергии; 2 — круглый волновод; 3 — диэлектрическая труба; 4 — согласованная нагрузка; 5 — диафрагмированный волновод; $\Phi 1$ — диаметр круглого волновода; $\Phi 2$ — внешний диаметр диэлектрической трубы и диафрагмированного волновода; $\Phi 3$ — внутренний диаметр диэлектрической трубы; l_1, l_2 — соответственно длина секции круглого и диафрагмированного волноводов; v — скорость движения диэлектрической трубы

Использование энергии микроволнового излучения позволяет равномерно нагревать диэлектрическую трубу и снижать внутренние термические напряжения в процессе реакции полимеризации, происходящей во всём объёме одновременно и приводящей к высоким прочностным характеристикам изделий [1—5]. Для равномерного нагрева труб применяют микроволновую установку, состоящую из двух секций. В первой секции в качестве нагревательного элемента задействован круглый волновод, создающий максимальную температуру на внутренней поверхности трубы и её спад по радиусу к внешней поверхности, а во второй — замедляющая система в виде диафрагмированного волновода, обеспечивающая максимальную температуру на внешней стороне трубы и её постепенный спад на внутренней. Таким образом, результирующее распределение температуры от двух секций микроволновой установки равномерно по всему сечению стенок трубы.

Каждая секция рассматриваемой установки состоит из электродинамической системы. Эта система с одной стороны согласована с источником СВЧ-энергии, а с другой — с

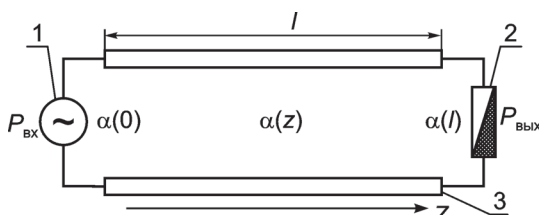


Рис. 2. Эквивалентная схема секции микроволновой установки термообработки диэлектрической трубы:

1 — источник СВЧ-энергии; 2 — согласованная нагрузка; 3 — однородная по длине труба из композиционного материала; l — длина электродинамической системы; Z — продольная координатная ось; $\alpha(0), \alpha(l)$ — постоянные затухания амплитуды напряжённости электрического поля в обрабатываемом материале в начале и конце секции микроволновой установки; $\alpha(z)$ — текущее значение постоянной затухания амплитуды напряжённости электрического поля в обрабатываемом материале в секции микроволновой установки

водяной нагрузкой, в которой установлен датчик неиспользованной мощности для контроля технологического процесса. На рис. 1 представлен общий вид двухсекционной установки для термообработки диэлектрических труб, имеющих внешний диаметр 60 мм и внутренний — 40 мм. Термообработку проводят на рабочей частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Энергия микроволнового излучения от источника СВЧ-энергии 1 поступает в первую секцию установки, выполненную в виде круглого волновода 2, и поглощается трубой 3 из полимерного композиционного материала. Труба 3 расположена между двумя трубками из фторопласта и движется вдоль оси волновода. Неиспользованная энергия поглощается водяной нагрузкой 4. Затем труба поступает во вторую секцию микроволновой установки, выполненную в виде диафрагмированного волновода 5, где энергия микроволнового излучения от источника СВЧ-энергии поглощается трубой, а неиспользованная энергия — водяной нагрузкой.

Секции микроволновой установки не связаны электромагнитным полем, так как между ними существует развязка в виде запердеального круглого волновода. Конструкции, в которых распространение энергии электромагнитного поля совпадает с направлением движения материала, называют установками с продольным взаимодействием. Каждая секция такой установки согласована с источником СВЧ-энергии и водяной нагрузкой. В этом случае отражённая волна в секциях отсутствует, а имеется только бегущая волна от источника СВЧ-энергии к нагрузке. Например, в первой секции микроволновой установки распространяется волна типа E_{01} . В качестве эквивалентной схемы каждой секции установки с продольным взаимодействием, работающей в режиме бегущей волны, использована нагруженная линия, представленная на рис. 2 [6—9]. Энергия микроволнового излучения от источника СВЧ-энергии 1 поступает в нагревательный элемент (круглый или диафрагмированный волновод), длиной l с нагреваемым материалом в виде трубы 3. Неиспользованная энергия поглощается нагрузкой 2.

Рассмотрим распределение температуры вдоль диэлектрической трубы, находящейся в стационарном режиме, для секции микроволновой установки с нагревательным элементом в виде круглого волновода. Выражение для расчёта распределения температуры в материале трубы вдоль оси Z имеет вид [6]:

$$T(z) - T_n = P_{\text{вх}} \exp(-2\alpha_n z) \frac{2\alpha_n f^2(Z, T) \tau}{\left[\pi(r_2^2 - r_3^2) c_d \rho_d \right]}, \quad (1)$$

где T_n — начальная температура диэлектрической трубы; $P_{\text{вх}}$ — выходная мощность источника СВЧ-энергии; α_n, α_k — постоянная затухания амплитуды электрического поля в материале трубы соответственно при начальной и конечной температурах; $f(z, T)$ — функция, учитывающая зависимость диэлектрических параметров материала трубы от температуры, в направлении распространения энергии электромагнитного поля; τ — время нахождения материала в области микроволнового излучения; r_3, r_2 — внутренний и внешний радиусы трубы, соответственно; c_d — теплоёмкость диэлектрического материала; ρ_d — плотность диэлектрического материала.

Зависимость мнимой части относительной диэлектрической проницаемости от температуры для полимеров в широком интервале имеет линейный характер на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц [6—9]. При этом вид функции $f(z, T)$ определён как

$$f(z, T) = \alpha_n / [\alpha_k - (\alpha_k - \alpha_n) \exp(-2\alpha_n z)]. \quad (2)$$

Температура в круглом волноводе распределена неравномерно по поперечному сечению трубы: снижается от внутреннего диаметра к внешнему по закону Бесселя:

$$T(r) = T(r_3) [J_1(2,405r/r_1)]^2, \quad (3)$$

где $T(r)$ — распределение температуры по радиусу трубы в круглом волноводе; $T(r_3)$ — температура на внутренней поверхности трубы; $J_1(2,405r/r_1)$ — функция Бесселя первого порядка первого рода, r_1 — радиус волновода, для частоты колебаний электромагнитного поля 2450 МГц на основной волне типа E_{01} .

Учитывая, что на волне типа E_{01} и указанной частоте колебаний электромагнитного поля критическая длина волны в круглом волноводе $\lambda_{кр} = 2,62r_1$, можно определить $r_1 = 50$ мм.

Для выравнивания температуры по поперечному сечению трубы в микроволновой установке установили вторую секцию, нагревательный элемент которой выполнен в виде диафрагмированного волновода внутренним диаметром 60 мм, соответствующим внешнему диаметру диэлектрической трубы. Диафрагмированный волновод создаёт на поверхности трубы максимальную температуру, спадающую по экспоненциальному закону к внутреннему диаметру трубы. Диафрагмированный волновод — замедляющая система, концентрирующая у поверхности электрическое поле, степень концентрации напряжённости которого определяется коэффициентом замедления k_3 . Запишем в первом приближении распределение температуры в такой системе:

$$\left. \begin{aligned} T(r) &= T(r_2) \exp \left[-2kk_3r \left(1 - \varepsilon'/k_3^2 \right)^{1/2} \right]; \\ T(r_3) &= T(r_2) \exp \left[-2kk_3r_3 \left(1 - \varepsilon'/k_3^2 \right)^{1/2} \right]; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $T(r_2)$, $T(r_3)$ — температуры на внешней и внутренней поверхностях трубы, соответственно; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число свободных пространства; $k_3 = \lambda/\lambda_3$ — коэффициент замедления, λ — длина волны источника СВЧ-энергии, λ_3 — замедленная длина волны в диафрагмированном волноводе;

$\varepsilon'_n, \varepsilon'_k, \varepsilon''_n, \varepsilon''_k$ — действительная и мнимая части относительной диэлектрической проницаемости материала при начальной и конечной температурах, соответственно.

Длину каждой секции выбирали так, чтобы температура на внешней и внутренней поверхностях трубы после прохождения ею микроволновой установки соответствовала номинальному значению, т. е. $T(r_2) = T(r_3) = 180^\circ\text{C}$. Для этого необходимо решить уравнения (1)—(4) методом последовательного приближения.

На рис. 3 представлены теоретически рассчитанная и экспериментальная зависимости температуры по поперечному сечению трубы. Из рассчитанной зависимости следует,

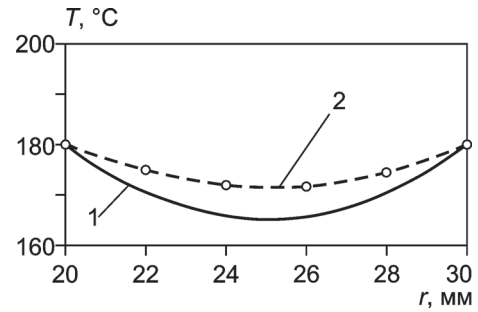


Рис. 3. Теоретическая (1) и экспериментальная (2) характеристики распределения температуры по поперечному сечению диэлектрической трубы для стационарного режима

что на внешней и внутренней поверхностях температура соответствует 180°C , а максимальное отклонение от этого значения наблюдается в центре стенки трубы. В этой области температура равна 166°C , а её отклонение составляет 14°C , что соответствует $7,7\%$. Уменьшить отклонение температуры от номинального значения можно при корректировке параметров микроволновой установки, например, изменяя выходную мощность источников СВЧ-энергии в каждой секции или k_3 в диафрагмированном волноводе.

Параметры микроволновой установки и обрабатываемого материала

Рабочая частота колебаний электромагнитного поля	 2450 МГц
Выходная мощность источника СВЧ-энергии первой секции	 0,6 кВт
Выходная мощность источника СВЧ-энергии второй секции	 0,6 кВт
Коэффициент стоячей волны	
для каждой секции в полосе частот 100МГц, не более	 1,5
в волноводной секции на рабочей частоте	 1,15
для секции замедляющей системы на рабочей частоте	... 1,25
Внутренний радиус волновода r_1	 50 мм
Внешний радиус трубы r_2	 30 мм
Внутренний радиус трубы r_3	 20 мм
Длина волноводной секции l_1	 900 мм
Длина секции замедляющей системы l_2	 300 мм
Скорость движения трубы в микроволновой установке	∅ 0,6 м/мин
Коэффициент замедления k_3	 3,0
Номинальная температура трубы T_k	 180°C
Начальная температура трубы T_n	 20°C
Фактор потерь	
ε''_n	 0,12
ε''_k	 0,18
Действительная часть относительной диэлектрической проницаемости материала	
при начальной температуре ε'_n	 4,0
при конечной температуре, ε'_k	 4,5
Теплоёмкость материала c_d	 0,8 Дж/(г · °C)
Плотность материала ρ_d	 2,4 г/см ³

Из экспериментальной зависимости распределения температуры по поперечному сечению трубы (см. рис. 3) следует, что на внешней и внутренней поверхности температура

равна 180 °С, а максимальное отклонение от номинального значения также наблюдается в центральной части стенки трубы. В этой области температура соответствует 172 °С, а следовательно, отклонение температуры от номинального значения — 8 °С, что составляет 4,4 %. Методика измерений распределения температуры по поперечному сечению трубы следующая:

создают 4 отверстия диаметром 3 мм на удалении от оси трубы 22, 24, 26, 28 мм;

время воздействия микроволнового излучения на поперечное сечение трубы подбирают так, чтобы температура на внешней поверхности соответствовала температуре на внутренней поверхности;

температуру измеряют термопарным термометром после отключения источников СВЧ-энергии.

Для безопасной работы обслуживающего персонала на входе и выходе микроволновой установки использовали специальные конструкции фильтров, препятствующие выходу микроволнового излучения из работающей установки. Конструкция этих фильтров защищена патентом [10]. Такие фильтры обеспечивают уровень побочных излучений от микроволновой установки ниже допустимых пределов. В результате исследований установлено, что уровень мощности побочных излучений на расстоянии 0,5 м от любой точки работающей микроволновой установки не превышает 10 мВт/см².

Заключение. Предложена конструкция микроволновых установок типа бегущей волны с равномерным распределением температуры по поперечному сечению диэлектрических труб. Такая микроволновая установка состоит из секций волноводного типа, обеспечивающих максимальную температуру на внутренней поверхности трубы, а также секций замедляющих систем, создающих максимальную температуру на внешней поверхности. Суперпозиция распространения температур от разных секций гарантирует распределение температуры по толщине материала трубы, удовлетворяющее требованиям технологического процесса.

Рассмотрена модель секции микроволновой установки в виде нагруженной длинной линии и метод расчёта распределения температуры по толщине труб, изготовленных из полимерных композиционных материалов при условии, что мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости материала линейно зависит от изменения температуры. Расхождение теоретически рассчитанной и измеренной зависимостей распределения температуры по толщине трубы из полимерного композитного материала при её нагреве до 180 °С не превысило 6 °С, а отклонение экспери-

ментальной зависимости распределения температуры по толщине трубы от номинального значения — 8 °С.

Л и т е р а т у р а

1. Navabpour P., Nesbitt A., Degamber B., Fernando G., Mann T., Day R. Comparison of the curing kinetics of the RTM6 epoxy resin system using differential scanning calorimetry and a microwave-heated calorimeter // J. Appl. Polymer Science. 2006. N. 99 (6). P. 3658—3668.
2. Petchuay S. The effect of microwave curing on the structure and properties of polymer resins and their blends, in Materials Science. 2004.
3. Menczel J. D., Prime R. B. Thermal analysis of polymers: fundamentals and applications. 2009.
4. Navabpour P., Nesbitt A., Degamber B., Fernando G., Mann T., Day R. Comparison of the curing kinetics of a DGEBA/acid anhydride epoxy resin system using differential scanning calorimetry and a microwave-heated calorimeter // J. Appl. Polymer Science. 2007. N. 104 (3). P. 2054—2063.
5. Hill D. J. T., George G. A., Rogers D. G. A systematic study of the microwave and thermal cure kinetics of the DGEBA/DDS and DGEBA/DDM epoxy amine resin systems // Polymers for Advanced Technologies. 2002. N. 13 (5). P. 353—362.
6. Мамонтов А. В., Нефёдов В. Н., Назаров И. В., Потапова Т. А. Микроволновые технологии. Монография. М.: Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий Московского института электроники и математики (технического университета), 2008.
7. Девяткин И. И., Иванов М. А., Кирюшин В. П. Замедляющие системы для СВЧ-нагрева диэлектрических стержней // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1972. № 5. С. 106—111.
8. Архангельский Ю. С., Девяткин И. И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. Изд-во Саратовского университета, 1983.
9. Окресс Э. СВЧ энергетика. М.: Мир, 1971.
10. Пат. 2060600 РФ. СВЧ-печь конвейерного типа (варианты) / В. Н. Нефёдов, Г. Г. Валеев, С. В. Корнеев, Ю. В. Карпенко // Изобретения. 1996. № 5.

Дата принятия: 03.11.2015.