

УДК 621.372: 621.365

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПОСТРОЕНИЯ СВЧ-КОМПЛЕКСА ОБРАБОТКИ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2012 В.И. Анфиногентов, Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин,  
Р.Р. Самигуллин, А.С. Шакиров

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н.Туполева – КАИ

Поступила в редакцию 15.03.2012

Работа посвящена вопросам выбора оптимальной структуры построения СВЧ-комплекса обработки термореактивных композитных материалов и математического моделирования составных структурных элементов комплекса с обеспечением равномерной обработки заготовок изделий при одно- и многоэлементных системах возбуждения электромагнитного поля в камерах обработки.

Ключевые слова: *математическое моделирование, термореактивные полимеры, композиты, функционально адаптивный СВЧ-реактор, СВЧ-нагрев*

В настоящее время СВЧ-технологии находят все большее применение в процессах обработки различных материалов. Преимущественные качества технологии СВЧ-обработки позволяют осуществлять такие технологические операции как нагрев, сушка, вулканизация и девулканизация, упрочнение и деструкция материалов, ряд других процессов [1, 2], что делает их привлекательными для температурной обработки (сушки) полимерных композиционных материалов (ПКМ).

**Цель работы:** выбор структуры СВЧ-установки для обработки протяженных (листовых) изделий из препрегов термореактивных полимерных композиционных материалов, позволяющей наилучшим образом обеспечить равномерность температурной обработки заготовок изделий.

*Анфиногентов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры специальной математики. E-mail: vianf@nicpre.kstu-kai.ru*

*Морозов Геннадий Александрович, доктор технических наук, директор научно-исследовательского центра прикладной электродинамики. E-mail: micooil@mail.ru*

*Морозов Олег Геннадьевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем*

*Насыбуллин Айдар Ревкатович, ассистент кафедры телевидения и мультимедийных систем*

*Самигуллин Рустем Разяпович, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и мультимедийных систем. E-mail: nicpre@list.ru*

*Шакиров Альберт Султанович, кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и мультимедийных систем. E-mail: shakirov\_albert@mail.ru*

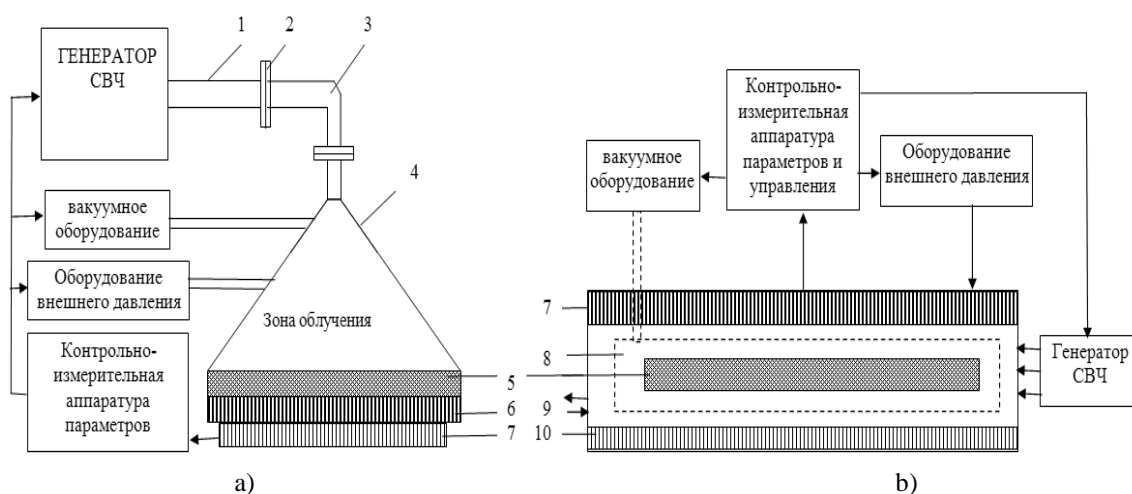
**Комплекс СВЧ-обработки изделий из термореактивных ПКМ.** При работе с композиционными материалами, одним из определяющих параметров является ориентация волокон. При этом непрерывный процесс изготовления дает дополнительное преимущество, обеспечивая надежный контроль их ориентации и натяжения. Изготовление гофрированных и плоских листов – это самое старое непрерывное промышленное производство композиционных материалов. Анализ научно-технической литературы, а также данных предварительных экспериментов показывает, что применение СВЧ-технологий позволяет интенсифицировать процессы изготовления изделий из препрегов термореактивных ПКМ (ТПКМ) [1-4]. Так как полимерное связующее, входящее в состав ТПКМ, относится к полярным диэлектрикам, то на СВЧ-частотах воздействия в обобщенную поляризацию молекул (так же и в вид образуемой матрицы) основной вклад вносят дипольная и объемная виды поляризации [1]. При управлении степенью включения каждого из видов поляризации возникает возможность «информационного» воздействия и получения изделия с иными, улучшенными характеристиками по отношению к традиционным (температурным) методам изготовления. Кроме того, преимуществом СВЧ-технологий является увеличение скорости достижения вязкотекучего состояния и стадии отверждения ТПКМ за счет передачи энергии электромагнитного поля СВЧ-диапазона практически

по всему объему обрабатываемого материала без потерь. Перечисленные преимущества можно реализовать в различных вариантах микроволновых технологических комплексах. По способу возбуждения ЭМП, СВЧ-комплексы условно подразделяются на одноэлементные и многоэлементные. Некоторые, наиболее целесообразные на взгляд авторов с точки зрения построения структуры таких комплексов для обработки изделий из препрегов ТПКМ, в качестве примеров представлены ниже.

**Одноэлементные СВЧ-установки.** Камера обработки изделия (рис. 1а), представляет собой рупорный облучатель, в основание которой помещается предварительно формованное изделие из ТПКМ. Источником ЭМП СВЧ-диапазона является магнетрон (средняя частота генерации  $F_1$ , выходная мощность  $P_1$ ). Генерируемая мощность

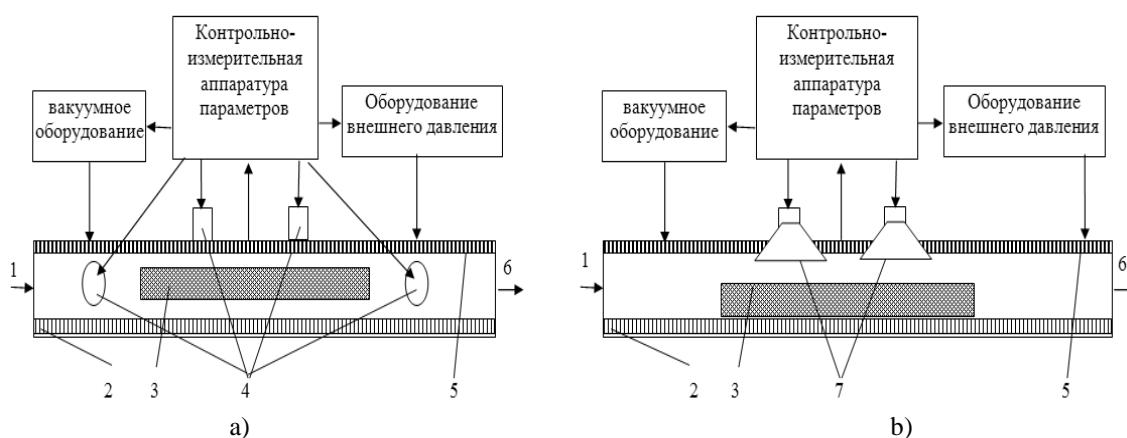
СВЧ поступает по волноводу в камеру с препрегом из ТПКМ, в котором происходит поглощение энергии ЭМП. Контроль параметров во время процесса полимеризации производится системой измерения. По совокупности параметров, полученных из системы измерения протекающего процесса, осуществляется управление режимами обработки. Достоинство – простота реализации схемы.

Другой вариант одноэлементного СВЧ-комплекса представлен на рис. 1б, где в отличие от схемы, представленной на рис. 1а, камера обработки исполнена в виде закрытого объемного резонатора. Недостатком такой системы является сложность в обеспечении равномерного распределения ЭМП по всему объему и не возможность обработки габаритных изделий (листовых).



**Рис. 1.** Обобщенные блок-схемы одноэлементных СВЧ комплексов обработки изделий из ТПКМ на основе: а) закрытого рупорного излучателя; б) закрытого резонатора:

1 – волновод; 2 – соединительные фланцы; 3 – угловой поворот; 4 – рупорный облучатель; 5 – изделие из ПКМ; 6 – регулируемая подставка, совмещенная с системой отражателей; 7 – распределенная система датчиков физических параметров; 8 – система обеспечения вакуума; 9 – система загрузки и выгрузки изделия; 10 – радиопоглощающий материал



**Рис. 2.** Обобщенные блок-схемы многоэлементных СВЧ комплексов обработки изделий из ТПКМ на основе: а) закрытой волноводной камеры; б) закрытой резонаторно-рупорной камеры:

1 – система загрузки изделия; 2 – радиопоглощающий материал; 3 – изделие из ПКМ; 4 – система распределенных излучателей микроволнового поля; 5 – распределенная система датчиков физических параметров; 6 – система выгрузки изделия; 7 – система распределенных генераторов микроволнового поля и рупорных излучателей

**Многоэлементные СВЧ-установки.** На схеме, представленной на рис. 2а обработка изделия из ТПКМ осуществляется в рабочей камере, представляющий собой закрытый волновод. Обеспечение распределения ЭМП по объему изделия осуществляется распределенной системой излучателей 4. Предварительно формованное изделие из ПКМ вводится и выводится системами загрузки и выгрузки. Недостатком, так же как и предыдущей схемы, можно считать сложность изготовления крупногабаритных форм изделия.

Таким образом, для обеспечения обработки крупногабаритных листовых форм изделий из препрегов ТПКМ наиболее предпочтительно построение камеры обработки в виде закрытого объемного резонатора, а для обеспечения равномерного распределения ЭМП по всему объему обрабатываемого изделия – распределенная многоэлементная система формирования ЭМП на основе рупорных излучателей (рис. 2б). Необходимо более детальное рассмотрение вопросов обеспечения равномерного распределения ЭМП

в камере обработки и проведения моделирования таких систем построения комплексов.

#### Моделирование равномерного нагрева.

Одним из требований, предъявляемых к распределению температуры в рабочей камере СВЧ-технологической установки, является ее равномерность по всему объему диэлектрика. Неравномерность распределения температуры в диэлектрике может сопровождаться большими температурными напряжениями, связанными с перегревом некоторых его частей, что в конечном итоге сказывается на качестве СВЧ-обработки материалов и изделий. Зачастую требование равномерности температурного поля при СВЧ-нагреве заменяется требованием создания и поддержания равно амплитудного электромагнитного по всему объему обрабатываемого диэлектрика, что в данном случае эквивалентно требованию равномерного нагрева. Для получения равномерного СВЧ-нагрева протяженного диэлектрика воспользуемся многоэлементной излучающей системой, расположенной над его поверхностью. В работе [5] показано, что при решении данной задачи функции:

$$T(z, y, t) = T_0 + \frac{2\alpha F_e S_0}{\lambda(4\alpha^2 + b^2)} \left( \exp(a^2(4\alpha^2 + b^2)t) - 1 \right) \exp(-2\alpha z) \sum_{i=1}^n \gamma_i \exp(-b|y - y_i|) \quad (1)$$

$$\text{И } T = T_0 + \frac{2\alpha F_e S_0}{\lambda \left( 4\alpha^2 - \frac{\pi^2}{4d^2} \right)} \left( \exp \left( a^2 \left( 4\alpha^2 - \frac{\pi^2}{4d^2} \right) t \right) - 1 \right) \exp(-2\alpha z) \sum_{i=1}^n \gamma_i \cos \frac{\pi(y - y_i)}{2d}, \quad (2)$$

при коэффициенте теплообмена  $\kappa = 2\alpha\lambda$ , определяют распределение температуры в диэлектрике для многоэлементной системы возбуждения электромагнитного поля, при частном значении коэффициента теплообмена на границе диэлектрика, и при  $z=0$ . В выражениях (1) и (2) приняты следующие обозначения:  $y=y_i$  – координаты  $i$ -го излучателя, расположенного над поверхностью диэлектрика,  $\gamma_i$  – амплитуды возбуждения излучателей,  $c, \rho, \lambda$  – теплоемкость, плотность и теплопроводность;  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $F_e$  – коэффициент энергетического прохождения,  $S_0$  – вектор Пойнтинга в вакууме.

Для улучшения равномерности распределения температуры возникает необходимость проведения операции оптимизации амплитуд возбуждения излучателей  $\gamma_i$ . В качестве критерия оптимизации выбран минимаксный критерий, как наиболее соответствующий улучшению равномерности электромагнитного и температурного полей, где амплитуды возбуждения излучателей  $\gamma_i$  определены из условия минимума величины

$$\max_{y \in [y_1, y_2]} \left| \phi_0(y) - \sum_{i=1}^n \gamma_i \phi(y, y_i) \right| \quad (3)$$

где  $\phi(y) = \sum_{i=1}^n \gamma_i \phi^{(i)}(y, y_i)$ ,  $\phi^{(i)}(y, y_i)$  – нормированная функция, определяющая вид поверхностного

распределения СВЧ-воздействия  $i$ -го излучателя, расположенного над поверхностью диэлектрика в точке с координатой  $y=y_i$ , для получения равномерного температурного поля в качестве функции  $\phi_0(y)$  можно выбирать функцию тождественно равную единице на отрезке  $[y_1, y_2]$ .

На рис. 3 приведены кривые, отражающие зависимость температуры от координаты  $y$  вдоль диэлектрика на разной глубине, соответствующие оптимизированному распределению амплитуд возбуждения излучателей  $\gamma_i$ . Пять источников электромагнитного поля расположены симметрично относительно центрального источника, расположенного в точке  $y=0$ , на расстоянии 1,25 м друг от друга. При оптимизации по критерию (3) были получены следующие значения:  $\gamma_1 = \gamma_5 = 0,922$ ,  $\gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_4 = 0,717$ . На том же рисунке приведены кривые, отражающие зависимость температуры от координаты  $y$  вдоль диэлектрика на разной глубине, соответствующие одиночному источнику, расположенному в точке  $y=0$ . Для кривых 1 и 4 глубина  $z=0$ , для кривых 2 и 5 –  $z=0,05$  м, а для кривых 3 и 6 –  $z=0,1$  м. Расчеты проводились при значениях электрофизических параметров соответствующих стеклопластику.

Приведенные на рис. 3 кривые показывают, что, во-первых, с увеличением глубины неравномерность температуры уменьшается (для

кривой 1 величина неравномерности температуры  $\delta=0,091$ , для кривой 2 –  $\delta=0,082$ , а для кривой 3 –  $\delta=0,068$ ) и, во-вторых, многоэлементное оптимизированное возбуждение источников существенно улучшает равномерность температурного поля по сравнению с одиночным источником ( $\delta=0,54$  для кривой 4,  $\delta=0,46$  для кривой 5 и  $\delta=0,34$  для кривой 6). При вычислении величины  $\delta$  неравномерности температуры в качестве заданной температуры  $T_{зад}$  использовалась величина  $0,5(T_{max}+T_{min})$ .

Если наряду с оптимизацией амплитуд возбуждения излучателей  $\gamma_i$  осуществлять еще оптимизацию координат расположения источников электромагнитного поля и вид функций, отражающих форму поверхностного распределения воздействия СВЧ-излучения, то улучшение равномерности температурного поля может быть еще более значительным.

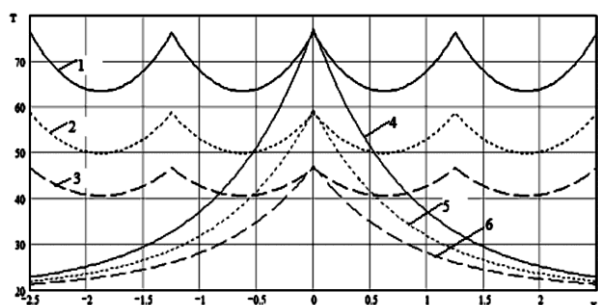


Рис. 3. Распределение температуры вдоль диэлектрика относительно центрального излучателя в точке  $y=0$

**Выводы:** как видно из приведенных на рис. 3 результатов, приведенная на рис. 2b схема установки позволяет обеспечить достаточную равномерность температурного поля, но лишь вдоль диэлектрика, в то время как отличие температуры на поверхности и в глубине остается

значительным. Однако в ряде важных практических случаев этого оказывается достаточным и эта схема установки позволяет осуществлять изготовление изделий из ТПКМ, в частности, протяженных плоских. Недостатком этой схемы СВЧ-установки является усложнение системы формирования температурных и электромагнитных полей, связанное с необходимостью учета взаимных связей излучателей. Более простой способ заключается в применении в качестве камеры обработки рупора достаточно большой длины, в раскрытие которого устанавливаются обрабатываемые образцы композиционного материала в состоянии препрега, вплотную прилегающий к отражающей поверхности (например, как показано на рис. 1a).

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Государственного контракта № 16.513.11.3114.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Thury, J. Microwave: Industrial, Scientific and Medical Applications. Artech House Boston London, 1992. 673 p.*
2. *Морозов, Г.А. Низкоинтенсивные микроволновые технологии. Методы и аппаратура / Г.А. Морозов и др. Под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова. – М.: Радио и связь, 2003. 128 с.*
3. *Morozov, G.A. Analysis of composite material properties after microwave field processing» / G.A. Morozov, O.G. Morozov, R.R. Samigullin, A.R. Nasibullin // 45th Annual Microwave Power Symposium. 2011. New Orleans, Louisiana, USA. P. 157-162.*
4. *Морозов, Г.А. Микроволновая обработка терморезистивных и термопластичных полимеров / Г.А. Морозов, О.Г. Морозов, А.Р. Насыбуллин, Р.Р. Самигуллин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. Периодический теоретический и научно-практический журнал. 2011. Т. 14, № 3. С. 114.*
5. *Анфиногентов, В.И. Математическое моделирование СВЧ нагрева диэлектриков. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2006. 140 с.*

## CHOICE OF THE OPTIMUM STRUCTURE OF CONSTRUCTION THE MICROWAVE COMPLEX OF PROCESSING THE THERMOSET COMPOSITE MATERIALS

© 2012 V.I. Anfinogentov, G.A. Morozov, O.G. Morozov, A.R. Nasybullin, R.R. Samigullin, A.S. Shakirov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

The paper is devoted to questions of a choice the optimum structure of construction the microwave complex of processing the thermoset composite materials and mathematical modeling of built-up structural elements of a complex ensuring the uniform processing of preforms products with one- and multiple elements systems of excitation the electromagnetic field in operating chambers.

Key words: *mathematical modeling, thermoset polymers, composites, functionally adaptive microwave reactor, microwave heating*

Vladimir Anfinogentov, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Special Mathematics. E-mail: vianf@nicpre.kstu-kai.ru; Gennadiy Morozov, Doctor of Technical Sciences, Director of Scientific Research Center of Applied Electrodynamics. E-mail: microoil@mail.ru; Oleg Morozov, Doctor of Technical Sciences, Head of the Television and Multimedia Systems Department; Aydar Nasybullin, Assitant at the Television and Multimedia Systems Department; Rustem Samigullin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Television and Multimedia Systems Department. E-mail: nicpre@list.ru; Albert Shakirov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Television and Multimedia Systems Department. E-mail: shakirov\_albert@mail.ru