

ГУЗЕВА ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
РЕЖИМОВ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ОРГАНОПЛАСТИКОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальности:

05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

05.17.06 – Технология и переработка полимеров и композитов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва 2014

Работа выполнена в федеральном государственном общеобразовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель – **Резник Сергей Васильевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Барзов Александр Александрович**
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник МГУ им. М.В. Ломоносова

Люсова Людмила Ромуальдовна
доктор технических наук, профессор
МИТХТ им. М.В. Ломоносова

Ведущая организация – ФНИЦ ОАО «Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения»,
Московская обл., г. Хотьково

Защита состоится «26» марта 2014 г. в 14 ч. 30 мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 при МГТУ им. Н.Э. Баумана
по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просьба
выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Телефон для справок: 8 (499) 267 09 63.

Автореферат разослан «20» февраля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.06,
доктор технических наук,
доцент



Михайлов В.П.



Актуальность работы. В перспективных машиностроительных конструкциях, имеющих форму цилиндрических оболочек, таких как: магистральные трубопроводы, контейнеры, емкости, корпуса химических реакторов, дымовые трубы, опоры и другие силовые элементы линий электропередач и мостов, в разнообразных летательных аппаратах предполагается широко использовать полимерные композиционные материалы (ПКМ). Эти материалы обладают ценным сочетанием физико-механических характеристик. Применение ПКМ сдерживает операция отверждения связующего, которая занимает пятьдесят и более процентов от общей длительности производства. Наиболее часто отверждение заготовок проводят в автоклавах и электрических печах, что требует больших затрат энергии в силу низких значений энергетического к.п.д., но далеко не всегда обеспечивает требуемое качество готовых деталей. Таким образом, **актуально совершенствование технологических режимов отверждения, в которых высокое качество продукции и производительность сочетаются с умеренной стоимостью оборудования и малыми энергетическими затратами.**

Исследования последних лет выявили перспективность обработки диэлектриков с использованием энергии электромагнитных колебаний сверхвысоких частот (СВЧ). СВЧ-нагрев диэлектриков носит объемный характер. Это значительно ускоряет процесс отверждения по сравнению с традиционными методами конвективного или лучистого нагрева, способствует формированию более однородного распределения температуры в заготовке, и, как следствие, получению деталей с лучшим качеством отверждения.

Вместе с тем в освоении технико-экономических преимуществ СВЧ-нагрева заготовок деталей из ПКМ преобладают интуитивно-эмпирические методы, теоретический анализ строится на приближенных тепловых моделях, не позволяющих прогнозировать режимы обработки с требуемой точностью. Измерения температуры в технологических экспериментах часто носят косвенный характер и не дают объективных данных о состоянии обрабатываемой детали. Недостаточно освещены вопросы увязки технологических экспериментов и структурного анализа ПКМ в готовых деталях. Информация по использованию СВЧ-нагрева деталей из ПКМ с различными наполнителями и связующими носит отрывочный характер. В частности, не ясно, какие режимы предпочтительны для получения высококачественных деталей из органопластиков, а именно: как связаны между собой форма детали, состав исходных компонентов и завершенность процесса полимеризации с мощностью и продолжительностью СВЧ-нагрева.

Цель работы – снижение материальных затрат, повышение производительности и качества деталей из органопластиков при СВЧ-нагреве заготовок за счет расчетно-теоретического и экспериментального обоснования рациональных технологических режимов отверждения полимерного связующего.

Для достижения цели в диссертации решаются следующие **задачи**:

1. Разработка методики технологического эксперимента, реализующего преимущества СВЧ-нагрева заготовок деталей из органического наполнителя и полимерных смол.

2. Математическое моделирование технологической операции отверждения заготовок деталей из органопластика при СВЧ-нагреве с использованием современных программных продуктов.

3. Анализ завершенности процесса полимеризации при СВЧ-нагреве с помощью микроструктурных исследований экспериментальных образцов.

4. Отработка техники управления технологическим процессом с помощью контактных термоэлектрических датчиков при СВЧ-нагреве экспериментальных образцов с приборной фильтрацией высокочастотных помех.

5. Подготовка рекомендаций по применению СВЧ-нагрева для ускоренной полимеризации трубчатых заготовок деталей из органопластиков.

Тема диссертации отвечала планам работ по реализации задач: Федеральной космической программы России на 2006–2015 гг. в части создания новых материалов и технологий производства конструкций ракетно-космической техники. Актуальность темы подтверждается участием автора диссертации в выполнении НИР по теме «Орбита-МГТУ», договор № (27-101-2011)-1001/186-2011 от 18.08.2011. Отдельные результаты получены при финансовой поддержке по проектам № 2.1.2/5865 и № 2.1.2/11304 аналитической ведомственной целевой программы Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2011 гг.)», а также в рамках соглашений о научно-техническом сотрудничестве с ЗАО «Центр высокопрочных материалов «Армированные композиты» № 29/05-13 от 01.06.2013 и ФГБОУ ВПО «НИУ «Высшая школа экономики» №16/11-13 от 23.10.13.

Научная новизна диссертации

1. **Первые** проведены исследования по отверждению в СВЧ поле образцов, с наполнителем из органоволокну с матрицей на основе эпоксидной смолы. Получены новые данные о связи мощности и длительности действия СВЧ излучения со степенью полимеризации и изменением структуры ПКМ, открывающие путь к существенному улучшению качества изделий.

2. Применены новые средства управления технологическим процессом отверждения полимерного связующего в заготовках деталей из ПКМ с помощью СВЧ-нагрева, включая контактные термоэлектрические датчики в сочетании с системой приборной фильтрацией высокочастотных помех.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Комплексный (расчетно-теоретический и экспериментальный) подход к выбору технологических режимов отверждения полимерного связующего в заготовках крупногабаритных трубчатых деталей из органопластика с помощью микроволнового излучения.

2. Математическая модель физико-технической обработки заготовок деталей СВЧ излучением, основанная на анализе нелинейной теплопроводности с внутренними источниками теплоты в системе «заготовка детали – оправка – датчики температуры».

3. Результаты математического моделирования физико-технической обработки заготовок деталей из органопластика СВЧ излучением, связывающие длительность и интенсивность воздействия излучения с динамикой нагрева заготовок композитных деталей и позволившие выявить влияние на эту динамику неопределенности характеристик композита.

4. Методика термометрирования для управления технологическим процессом СВЧ-нагрева заготовок композитных деталей с использованием контактных термоэлектрических датчиков и системы регистрации их показаний с фильтрацией высокочастотных помех.

Практическую ценность имеют следующие результаты:

1. Комплекс методик составляющих основу технологического эксперимента по СВЧ-нагреву заготовок деталей из органического наполнителя и эпоксидного связующего.

2. Рекомендации в части режимов обработки СВЧ излучением заготовок деталей из органопластиков.

Указанные результаты использованы при разработке технологического процесса изготовления транспортно-пускового контейнера «Центра спецтехники» МГТУ им. Н.Э. Баумана и в изделиях из ПКМ ЗАО «Центр высокопрочных материалов «Армированные композиты» г. Хотьково, а так же в учебном процессе в МГТУ им. Н.Э. Баумана, что отражено в актах о внедрении.

Достоверность результатов исследований гарантируется корректностью выбора допущений при постановке задач, адекватностью применяемых моделей физических явлений, строгостью использования современного математического аппарата, а также сравнением с экспериментальными данными.

Личный вклад автора состоит в разработке технологического процесса ускоренного отверждения связующего в заготовках деталей из органопластика, разработке математической модели, анализе и обобщении полученных данных, сопоставлении теоретических и экспериментальных данных, проведении исследований комплекса физических свойств ПКМ. Все основные результаты и выводы получены лично автором.

Апробация основных результатов диссертации проводилась на научных конференциях и семинарах, в том числе: 3-й Международной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы» (Москва, 2007), 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмические технологии» (Реутов, 2010) [11], 1-st International workshop «Advanced composite materials and technologies for aerospace applications» (Wrexham, Wales, UK, 2011) [8], 2-nd International conference «Advanced composite materials and technologies for aerospace applications» (Wrexham, Wales, UK, 2012) [9], 4-й международной конференции «Ракетно-космическая техника: фундаментальные и прикладные проблемы» (Москва, 2013), на научных семинарах в МГТУ им. Н.Э. Баумана (1992-2013).

Материалы диссертации отражены в 13 научных работах, в том числе в 4 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов к главам, общих выводов и приложения, содержит 163 страницы текста, 100 рисунков, 18 таблиц. Список литературы включает 112 работ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. В ней освещены вопросы применения ПКМ в перспективных машиностроительных конструкци-

ях, имеющих форму цилиндрических оболочек. Особо выделена перспективность использования органопластиков в трубопроводах и контейнерах. Приведен обзор способов отверждения полимерного связующего и выделены преимущества СВЧ-нагрева. Рассмотрены вопросы математического моделирования СВЧ-нагрева диэлектриков и сделан вывод о преобладании упрощенных тепловых моделей. Отмечена целесообразность повышения точности расчетов с помощью новых программных продуктов, реализующих метод конечных элементов. Систематизированы данные о современных средствах измерения температуры, которые могут применяться в технологии СВЧ-нагрева заготовок деталей из ПКМ. Подчеркнута необходимость учета методических погрешностей. Приведена структура технологического процесса производства деталей из ПКМ в форме тонкостенных оболочек и определены основные показатели качества этих деталей. Намечены направления расчетно-теоретических и экспериментальных исследований.

Во второй главе сформулированы математическая модель прогрева детали, имеющей форму полого цилиндра конечных размеров с заделанной внутрь термопарой под действием СВЧ излучения (Рис. 1).

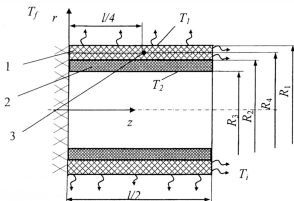


Рис. 1. Геометрическая модель заготовки детали:
1 – заготовка детали; 2 – оснастка; 3 – термопара

Физическая модель теплообмена заготовки детали строится на следующих допущениях:

- Заготовка детали расположена в центре камеры и равномерно по окружности и вдоль продольной оси облучается микроволнами. Энергия СВЧ излучения объемно и равномерно поглощается в материале заготовки. Оснастка инертна по к СВЧ излучению, но способна проводить и аккумулировать теплоту.
- Процесс теплообмена – нестационарный трехмерный.
- На боковых поверхностях и торцах заготовки происходит конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой, температура которой принимается постоянной во времени и равной начальной температуре заготовки.
- При термообработке многократные переотражения теплового излучения между поверхностью заготовки и стенками камеры СВЧ нагрева не учитываются.

ся. Другими словами: стенки камеры считаются абсолютно холодными и излучательная способность их поверхности, обращенной к заготовке, равна единице.

- Материал заготовки детали считается однородным, ортотропным.

- Характеристики материала зависят от температуры.

- Форма образца в процессе нагревания не меняется. Выделение или поглощение теплоты в материале при физико-химических процессах отверждения учитывается температурной зависимостью удельной теплоемкости.

- Тепловой контакт заготовки детали с оснасткой и термопарами идеальный.

В силу симметрии достаточно рассмотреть только половину длины составного цилиндра l . R_1 и R_2 – внешний и внутренний радиусы цилиндрической заготовки, R_2 и R_3 – внешний и внутренний радиусы цилиндрической оснастки; R_4 – радиус закладки термопары.

Сформулированной выше физической модели соответствует математическая модель, которая включает в себя трехмерное, нестационарное, нелинейное уравнение теплопроводности для ортотропного тела с соответствующими начальными и граничными условиями.

Удельное количество теплоты, выделенной в ПКМ за счет энергии электромагнитного поля, определяется следующим выражением:

$$q_{mw}(T) = \varepsilon_0 \tilde{\varepsilon}(T) \operatorname{tg} \delta(T) f E^2, \quad (1)$$

где: ε_0 – электрическая постоянная, Ф/м; $\tilde{\varepsilon}$ – диэлектрическая проницаемость; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; f – частота, Гц; E – напряженность электрического поля, Вт/м.

Удельная мощность, выделяемая в скин-слое металлического проводника чувствительном элементе – спае термопары, определяется по формуле:

$$\Delta P = \frac{E^2}{4 \cdot \sqrt{\pi \cdot \tilde{\rho} \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot f}}, \quad (2)$$

где $\tilde{\rho}$ – удельное электрическое сопротивление материала термопары, Ом·м; μ – относительная магнитная проницаемость материала термопары; μ_0 – магнитная постоянная, Гн/м.

Для термопары величина q_{mw} рассчитывается по формуле:

$$q_{mw} = 4 \cdot \Delta P / d_t, \quad (3)$$

где d_t – диаметр термопары.

На Рис. 2 представлены результаты вычислительных экспериментов, проведенных с помощью программного комплекса ANSYS, реализующего метод конечных элементов. Они свидетельствуют о сложной динамике прогрева заготовки детали из органопластика под действием СВЧ излучения. С увеличением длительности обработки температурное поле в заготовке становится однородным, а различие в температурах детали и термопары составляет менее 1 град. Данные результаты подтверждают эффективность СВЧ-нагрева и возможность использования недорогих средств измерения – термопар.

При численном моделировании использовались данные по характеристикам органопластика, которые были определены экспериментально с помощью современного оборудования.

Для анализа влияния характеристик органопластика на динамику прогрева заготовки проведена серия параметрических расчетов. Было исследовано влияние: излучательной способности органопластика, коэффициента теплопроводности органопластика, удельной теплоемкости материала заготовки, удельной мощности СВЧ излучения, подводимой к заготовке, толщины заготовки детали на динамику прогрева под действием СВЧ излучения.

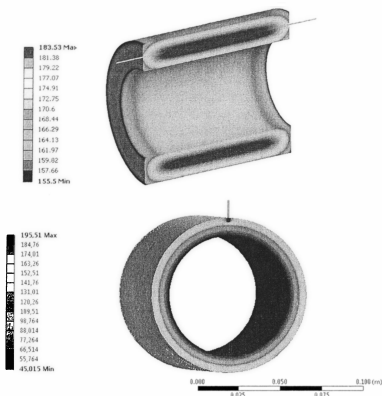


Рис. 2. Распределение температур в образце органопластика и термопаре, °С

Из результатов расчетов следует, что из-за сравнительно невысокой температуры поверхности влияние излучательной способности на динамику прогрева мало. Расчеты по модели изотропного и ортотропного материала при соотношении коэффициентов теплопроводности в радиальном направлении и вдоль продольной оси $\lambda_r / \lambda_z = 1,5$ при $\lambda_r = 0,2 \text{ Вт/(м·К)}$, показали, что отличие температуры детали не превышает 3,3 %. Следовательно, в диапазоне λ_r / λ_z , близком к указанному уровню, отпадает необходимость в проведении достаточно сложных исследований теплопроводности в направлениях главных осей r и z .

Вместе с тем, при прогнозировании технологических режимов отверждения необходимо учитывать температурную зависимость удельной теплоемкости материала (Рис. 3). Без такого учета погрешность в определении температуры

достигает 31 %, если же брать среднее значение удельной теплоемкости в диапазоне температур отверждения, то эта погрешность достигает 17 %.

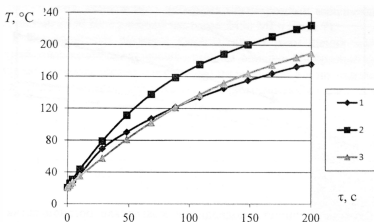


Рис. 3. Влияние удельной теплоемкости на динамику СВЧ-нагрева:
1 – $c = f(T)$; 2 – $c = 830$ Дж/(кг·К), $T = 20$ °С; 3 – $c = 1378$ Дж/(кг·К),
среднее значение в диапазоне температур отверждения

При увеличении толщины заготовки детали увеличивается ее массовая теплоемкость, что приводит к снижению скорости нагрева (Рис. 4).

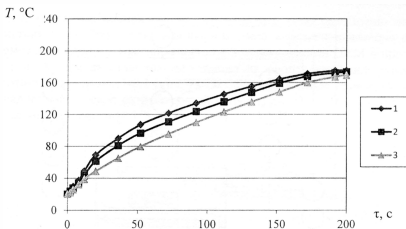


Рис. 4. Влияние толщины заготовки детали на динамику СВЧ-нагрева:
1 – толщина 4,5 мм; 2 – толщина 6,0 мм; 3 – толщина 7,5 мм

При выборе режимов отверждения можно воспользоваться результатами расчетов, представленных на Рис. 5. Хорошо видно, что, чем выше мощность СВЧ-нагрева, тем быстрее может быть достигнут требуемый уровень температуры заготовки детали.

$T, ^\circ\text{C}$

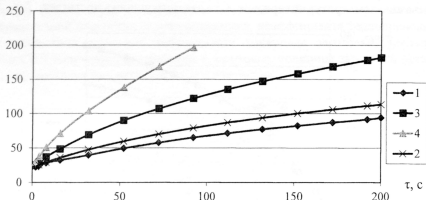


Рис. 5. Влияние мощности, подводимой к заготовке органопластика, на длительность обработки: 1 – 450 Вт; 2 – 600 Вт; 3 – 2400 Вт; 4 – 3600 Вт

В третьей главе дано описание основных этапов технологического эксперимента по СВЧ-нагреву плоских и полых цилиндрических образцов. Рассмотрены этапы подготовки экспериментальных образцов, техника нагрева, процедура обработки и анализа экспериментальных данных. Процесс отверждения мало-размерных образцов проходил в микроволновой печи «Электроника СП-10М» лаборатории кафедры СМ-13 МГТУ им. Н.Э. Баумана (Рис. 6).

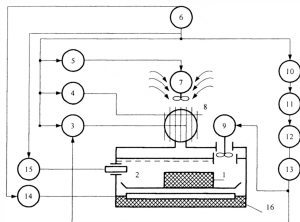


Рис. 6. Схема микроволновой печи «Электроника СП-10М»:

- 1 – обрабатываемое изделие; 2 – резонатор; 3 – трансформатор анодный;
- 4 – накальный трансформатор; 5 – блок автоматики; 6 – ввод; 7 – вентилятор;
- 8 – магнетрон; 9 – диссектор; 10 – блок защиты; 11 – блок управления;
- 12 – регулятор мощности; 13 – реле времени; 14 – электрический нагреватель;
- 15 – термопара; 16 – теплоизоляция

Отверждение связующего в трубах выполнялось на экспериментальной установке МИЭМ (НИУ «Высшая школа экономики») с СВЧ камерой прямоугольного типа, оснащенной четырьмя магнетронами максимальной суммарной мощностью 2400 Вт с рабочей частотой 2450 МГц (Рис. 7).

В совокупности размеры камеры, схема размещения магнетронов на ее верхней крышке и тонкостенная стальная оправка П-образной формы обеспечивали равномерный нагрев связующего по всей длине и по толщине стенки трубы за счет переотражения и наложения электромагнитных волн.

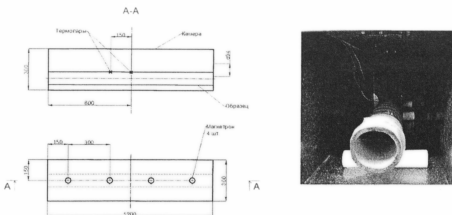


Рис. 7. Схема размещения заготовки детали внутри камеры СВЧ-нагрева

Температура измерялась внутри образцов непосредственно во время воздействия СВЧ излучения термопарами типа «хромель-алюмель» с диаметром термоэлектродов 0,2 мм, закреплёнными между слоями ПКМ в процессе намотки (Рис. 8) или на заданном расстоянии от фронтальной поверхности внутри заготовки детали из ПКМ (Рис. 9). Экспериментальные термограммы корректировались с помощью разработанной аппаратуры (Рис. 10), фильтрующей высокочастотные помехи [8,11].

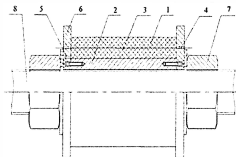


Рис. 8. Схема размещения термопары в малоразмерной заготовке детали:

- 1 – заготовка детали; 2 – фторопластовая оправка; 3 – термопара;
- 4 – вывод термоэлектрода; 5 – отверстие для нити подвески;
- 6 – щека; 7 – прижимная гайка; 8 – вал намоточного станка

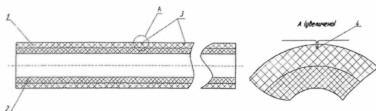


Рис. 9. Схема размещения термопар в заготовке детали:
1 – заготовка детали; 2 – оправка; 3 – термопара; 4 – спай термопары

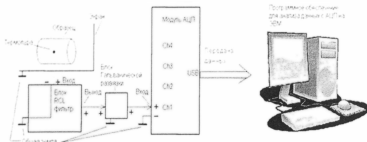


Рис. 10. Схема аппаратуры для регистрации показаний термопар при обработке экспериментальных образцов СВЧ излучением

Сопоставление экспериментальных и расчетно-теоретических значений температуры спая термопары представлено на Рис. 11. Определено, что расхождение в полученных температурных значениях спая термопары (экспериментальных и расчетных) может достигать 17% в начале эксперимента. Однако при температурах начала полимеризации расхождение в показаниях не превышает 2%. Расхождение обусловлено, по-видимому, отсутствием плотного контакта спая термопары с заготовкой детали во время эксперимента. С увеличением температуры контакт спая термопары с заготовкой детали улучшается вследствие температурного расширения и разброс между экспериментальными и расчетными данными значительно снижается.

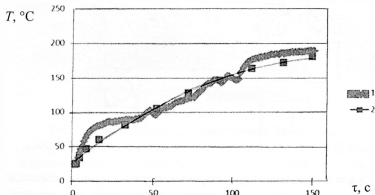


Рис. 11. Сопоставление экспериментальных (1) и расчетно-теоретических (2) значений температуры спая термопары

Освоение новой технологии производства композитных конструкций обычно сопровождается сбором доказательств, подтверждающих сохранение прежних или достижение лучших характеристик материалов. Для композитных конструкций, таких, как трубопроводы или контейнеры с повышенным внутренним давлением (Рис. 12), сравнение известной и новой технологии проводили по микроструктурным (степень и однородность полимеризации) и механическим характеристикам (плотность, предел прочности и модуль упругости на изгиб) ПКМ.

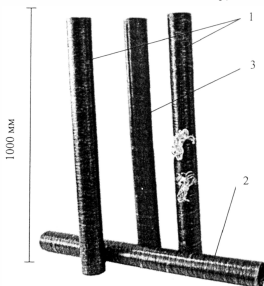


Рис. 12. Трубы из ПКМ:

1 – органопластик, обработана СВЧ излучением; 2 – органопластик, обработана в электрической печи; 3 – стеклопластик, обработана в электрической печи

Сравнительное исследование образцов связующего, волокон наполнителя и микропластика, обработанных в микроволновой печи «Электроника СП-10М» при мощности электромагнитного поля 450 Вт и в электрической печи при 160°C показало, что отверждение связующего при СВЧ нагреве происходит в 10-14 раз быстрее чем при нагреве в электрической печи. Как видно из Рис. 13, микропластик (нить Армос 100А, пропитанная связующим ЭДТ-10) после обработки в микроволновой печи способен выдерживать в 1,3 большую нагрузку, чем микропластик, обработанный в обычной электрической печи.

При испытании труб из ПКМ на изгиб была измерена величина изменения диаметра образца вдоль линии приложения усилий. Установлено, что модуль упругости на изгиб на 30 % органопластика трубы № 1, отвержденной СВЧ излучением, выше модуля упругости органопластика трубы № 2, отвержденной в электрической печи (Рис. 14). Вес органопластиковых труб №1, 2 (1,91 кг) меньше стеклопластиковой трубы №3 (2,52 кг) на 24%.

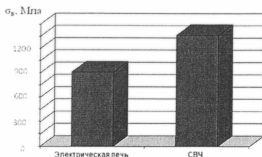


Рис. 13. Сравнение прочности заготовок деталей из органопластика

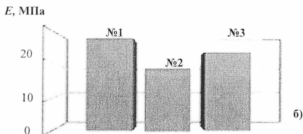
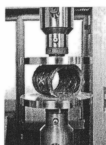


Рис. 14. Испытание образцов на изгиб: а) – процесс испытания; б) – сравнение модулей упругости на изгиб материалов деталей

Микроструктура органопластика, после обработки СВЧ излучением более однородная, связующее распределено по всему объему (как вокруг жгутиков, так и внутри них, вокруг элементарных волокон). При обработке в электрической печи, связующее большими порциями, вперемешку с порами скапливается по краям и в отдельных зонах. Полученные фотоснимки были обработаны с помощью программы KSLite 2.0 для определения процентного содержания пор и неармированных участков связующего (Рис. 15). Результаты расчетов показали, что при обработке образцов в электрической печи, структура более пористая: в образце, обработанном в СВЧ, площадь неармированных участков (скоплений связующего) составляет 8,5 %, пористость – 3,0 %, а в образце, обработанном в электрической печи, неармированные участки – 12,7 %, поры – 15,2 %.

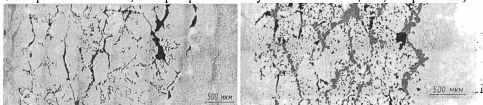


Рис. 15. Микроструктура органопластика в кольцевых образцах:
а) – обработанного в микроволновой печи «Электроника СП-10М» на мощности 450 Вт в течение 25 мин; б) – обработанного в электрической печи при 140 °С в течение 6 часов; ■ – эпоксидное связующее, □ – поры

При оценке объемной доли армирующего компонента, для образца, обработанного в электрической печи, процентное содержание армирующего компонента составило 61,3%, а для образца, обработанного СВЧ излучением – 75,2%.

Преимущества технологии отверждения полимерного связующего микроволновым излучением в заготовках деталей из органопластика, в том числе и экономические, видны из Таблицы 1.

Таблица 1.

Сравнение технологий отверждения полимерного связующего

№	Величина Показатель	СВЧ-нагрев	Электрическая печь
Технология			
1	Энергетическая эффективность, кВт/час	4	40
2	Время обработки, час	0,2 - 0,5	6
3	Снижение себестоимости по статье затраты на электроэнергию в год, %	400	0
Материал			
4	Модуль упругости на изгиб, ГПа	29	20
5	Пористость, %	до 4	до 18
6	Предел прочности на растяжение, МПа	1350	1000

В четвертой главе дано описание методик:

1. Методика прогнозирования параметров технологического процесса отверждения с помощью численных алгоритмов.

2. Методика проведения технологического эксперимента по ускоренному отверждению полимерного связующего в заготовке композитной детали под действием микроволнового излучения.

3. Методика управления технологическим процессом отверждения полимерного связующего при микроволновой обработке.

4. Методика микроструктурного анализа композиционных материалов в деталях, отвержденных микроволновым излучением.

Методика прогнозирования параметров технологического процесса устанавливает порядок математического моделирования прогрева заготовок деталей из ПКМ под действием микроволнового излучения. Результаты моделирования позволяют выявить степень влияния характеристик материала, размеров детали, мощности и длительности воздействия СВЧ излучения на динамику нагрева.

Методика проведения технологического эксперимента определяет содержание и последовательность операций по ускоренному отверждению полимерного связующего в заготовке композитной детали под действием микроволнового излучения. В теоретическом плане методика опирается на результаты математического моделирования процессов теплообмена, сопровождающих воздействие микроволнового излучения на детали из ПКМ. Настоящая методика отработана на ПКМ, состоящих из органического наполнителя и эпоксидного связующего.

Методика управления технологическим процессом определяет последовательность и условия измерений температуры заготовок деталей из ПКМ термо-

парами при микроволновой обработке полимерных связующих. Для реализации данной технологии отверждения необходима достоверная информация о температурной динамике обрабатываемых деталей с использованием недорогих, надежных, простых в изготовлении и эксплуатации датчиков температуры.

Методика микроструктурного анализа предназначена для оценки качества материала деталей после микроволновой обработки связующего. Она позволяет определить процентное содержание пор и неармированных участков связующего.

Четвертая глава завершается рекомендациями по практическому применению СВЧ-нагрева для ускоренного отверждения связующего трубчатых заготовок деталей из органопластиков:

1. Назначение технологических режимов отверждения полимерного связующего в заготовках деталей из органопластика под действием СВЧ-нагрева необходимо проводить по результатам моделирования с использованием современных программных продуктов, учитывающих нелинейность и нестационарность физико-технических тепловых процессов, их объемный характер и тем самым повысить точность прогнозирования режимов на 20% по сравнению с расчетами по линейным одномерным моделям. Например, по результатам моделирования рациональный режим обработки заготовок трубчатых деталей из органопластика длиной 1200 мм, внутренним диаметром 85 мм, толщиной стенки 4,5 мм, до температуры 180 °С, соответствует продолжительности нагрева 5 минут, мощности 2400 Вт, частоте излучения 2450 МГц. Расчетно-теоретические данные показывают, что при увеличении толщины детали в 2 раза и сохранения диаметра и длины, продолжительность обработки увеличится в 1,5 раза.

2. Для получения достоверных результатов прогноза режимов отверждения полимерного связующего в заготовках деталей из органопластика под действием СВЧ-нагрева в расчетах должны быть использованы экспериментальные данные по теплофизическим характеристикам ПКМ, полученным на образцах, идентичных по составу материалам натуральных конструкций. Рекомендуется обрабатывать экспериментальные данные с помощью математико-алгоритмического аппарата обратных задач теплопроводности, реализованного в пакете программ CAR МГТУ им. Н.Э. Баумана.

3. Повышение точности непрерывного теплового контроля режимов СВЧ-нагрева заготовок композитных деталей контактными термоэлектрическими датчиками обеспечивает система приборной фильтрацией высокочастотных помех, разработанная в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

4. Разработанный в настоящей работе физико-технический метод отверждения связующего в заготовках деталей из органопластика особо эффективен при серийном производстве в сочетании с другими высокопроизводительными технологическими операциями, такими как намотка и пултрузия.

5. Апробированные в настоящей работе методы и средства могут быть распространены на заготовки деталей из стеклопластика, углепластика и гибридных ПКМ. Основанием для этого может служить единство полимерной матричной основы и технологических операций получения заготовок.

Результаты настоящей работы целесообразно внедрять в ЗАО «Центр высокопрочных материалов «Армированные композиты» г. Хотьково, ОАО «ОНПП

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые теоретически и экспериментально обоснованы подходы к осуществлению технологии отверждения полимерного связующего в заготовках крупногабаритных трубчатых деталей из органопластика с помощью микроволнового излучения. По сравнению с традиционной технологией отверждения в электрических печах разработанная технология позволяет сократить время отверждения в 5-10 раз, уменьшить затраты электроэнергии в 4-5 раз, повысить однородность структуры ПКМ, снизив в 5-7 раз его пористость, повысить прочностные характеристики материала – повысить модуль упругости на изгиб 30%, предел прочности на растяжение на 20 %.

2. Для выбора режимов отверждения заготовок композитных деталей трубчатой формы микроволновым излучением разработана математическая модель нелинейной теплопроводности с внутренними источниками теплоты в системе «заготовка детали – оправка – датчики температуры». С помощью расчетов впервые установлена связь между длительностью и интенсивностью воздействия СВЧ излучения и динамикой нагрева заготовок композитных деталей, выявлена степень влияния неопределенности теплофизических и оптических характеристик композита на нестационарные температурные поля в заготовке детали. Установлено, что наиболее сильное влияние на уровень температуры и темпы нагрева оказывает удельная теплоемкость ПКМ и пренебрегать ее температурной зависимостью нельзя, так как это может внести большие искажения в результаты прогноза.

3. Применены новые средства управления технологическим процессом отверждения полимерного связующего в заготовках деталей из ПКМ с помощью СВЧ-нагрева, включая контактные термoeлектрические датчики в сочетании с системой приборной фильтрацией высокочастотных помех. Новые средства существенно повышают точность теплового контроля режимов СВЧ-нагрева заготовок композитных деталей.

4. Подтверждена практическая возможность получения натуральных изделий высокого качества из органопластика с отверждением связующего под действием СВЧ-нагрева, имеющих форму цилиндрических оболочек для использования в трубопроводах, транспортных контейнерах, корпусах ракетных двигателей твердого топлива. По весовым характеристикам такие конструкции из органопластика на 30 - 40% превосходят аналогичные конструкции из стеклопластика, не уступая им по прочности.

5. Методы и результаты диссертации нашли применение в ряде НИР и ОКР и используются в учебном процессе кафедры СМ-13 в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Буланов И.М., Гузева Т.А., Шворобей Ю.Л. Обработка полимерных композиционных материалов в стоячих волнах многомодового резонатора микро-

волновой печи // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 1997. №4. С. 42-49.

2. Методы снижения уровня побочных излучений от СВЧ установок лучевого типа для термообработки материалов / Т.А. Гузева [и др.] // Технологии ЭМС. 2013. №3 (46). С. 24-28.

3. Бойцов Ю.И., Гузева Т.А. Обеспечение случайности результатов экспериментальных исследований // Клеи. Герметики. Технологии. 2005. № 4. С. 34-35.

4. Бойцов Ю.И., Гузева Т.А. Максимально правдоподобные оценки параметров нормального закона распределения результатов испытаний // Клеи. Герметики. Технологии. 2007. № 7. С. 32-34.

5. Повышение качества СВЧ отверждения труб из полимерных композиционных материалов / Т.А. Гузева [и др.] // Вопросы оборонной техники. Серия 15 – Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 1993. Вып. 1-2 (105-106). С. 23-26.

6. Буланов И.М., Гузева Т.А., Шворобей Ю.Л. Совершенствование технологии СВЧ-отверждения намоточных изделий из полимерных и композиционных материалов // Вопросы оборонной техники. Серия 15 – Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. 1995. Вып. 1 (111). С. 26-29.

7. Буланов И.М., Нехороших Г.Е., Гузева Т.А. Пленочные криогенные трубопроводы для аэрокосмической техники // Оборонная техника. 2008. № 1-2. С. 102-107.

8. T. Guzeva. New results of investigation on manufacturing of composite construction materials using microwave radiation // Proceed 1-st International Workshop on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications. Wrexham (Wales, UK). 2011. P. 87-91.

9. Rumyantsev S., Reznik S., Guzeva T. Heat mathematical model of dielectric composite cylinder during microwave treatment // Proceed. 2-nd International Conference on Advanced Composite Materials and Technologies for Aerospace Applications. Wrexham (Wales, UK). 2012. P. 87-91.

10. Гузева Т.А. Новые подходы к повышению эффективности производства деталей из органопластиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №7. С. 53-56.

11. Гузева Т.А. Новые результаты в отработке технологии производства композитных конструкций с применением СВЧ-излучения // Аэрокосмические технологии, 2010-2012. М., 2012. С. 36-40.

12. Разработка моделей по локализации распределенных измерительных и функциональных модулей для изделий РКТ из керамоматричных композиционных материалов: Отчет об ОКР по теме «Сэндвич-Т – Композит – МГТУ» ГР № У92889 / МГТУ им. Н.Э. Баумана; Руководитель С.В. Резник, исполнители: Т.А. Гузева и [др.]. М., 2012. 91 с.

13. Создание перспективного транспортно-пускового контейнера РПГ из полимерных композиционных материалов: Отчет об ОКР по теме «Смесь-ЦКИБ» ГР №3/3/203-11-ДГОЗ / МГТУ им. Н.Э. Баумана; Руководитель С.В. Резник, исполнители: Т.А. Гузева и [др.]. М., 2013. 73 с.