**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ СМОЛ**

Руководитель НИР: кандидат технических наук А.В. Мамонтов

В настоящее время широкое применение находят композиционные материалы, создаваемые на основе сверхтонких минеральных, полимерных и углеродных волокон, пропитанных термореактивным связующим на основе полимерных смол с различными модифицирующими добавками. Современные технологии термоотверждения связующего вещества в композитах заключаются в передаче тепла конвекцией или излучением. При этом, принимая во внимание низкую теплопроводность самого композита, передача тепла от поверхности во внутреннюю область изделия происходит с низкой скоростью по сравнению со скоростью реакции полимеризации связующего вещества. Это приводит, помимо появления градиента температуры, направленного от поверхности изделия внутрь его объёма, к опережению полимеризации связующего в приповерхностном слое изделия по отношению к связующему в его объеме. Таким образом, прочный полимеризованный приповерхностный слой начинает препятствовать не только выходу микропузырьков из объема материала, но и удалению излишнего количества связующего. Полученный после окончательного отверждения всего объема материал обладает повышенным содержанием пор и остаточного, по сравнению с требуемым, полимерного связующего. Эти факторы неизбежно приводят к ухудшению физико-механических характеристик композита.

Следует отметить, что проблема усиливается при производстве материалов значительных толщин. Также ухудшение физико-механических характеристик композитов происходит и из-за неполноты реакции полимеризации связующего вещества.

Целью настоящей научно-исследовательской работы является улучшение физико-механических характеристик композиционных материалов на основе термореактивных полимерных смол при одновременном значительном снижении затрат на их производство.

Разрабатываемой научно-технической продукцией в 2018 году является модель и метод расчёта формирования заданного распределения температуры в материале, численные энергетические характеристики нагрева, трехмерные модели распределения температурного поля в образце композита, выбор электродинамических систем, сравнительные данные экспериментальных исследований об изменении физико-механических характеристик испытуемых образцов композитов после воздействия микроволнового излучения и отверждённых традиционным способом.

В представленной научно-исследовательской работе рассмотрены перспективы применения микроволновых технологий отверждения полимерных композиционных материалов на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон. Применение энергии микроволнового излучения в качестве источника тепла позволяет реализовать качественно новый уровень производства полимерных композиционных материалов, характеризующийся экологической чистотой, энергетической эффективностью и высокой скоростью технологических процессов. Приведены результаты экспериментальных исследований отверждения полимерных композиционных материалов проведены с использованием микроволновых установок на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Выбраны модель и метод расчета распределение температуры стержневых материалов в микроволновых установках на основе различных конструкций электродинамических систем. Предложены конструкции электродинамических систем микроволновых установок, которые позволяют формировать равномерное распределение температуры по объёму обрабатываемого полимерного композиционного материала и получать более высокие физико-механические характеристики выпускаемых изделий. Показано влияние микроволнового излучения на полимерное связующее композиционных материалов, например, термореактивные эпоксидные смолы, что приводит к изменению внутренней структуры материала, которая становится более плотной и прочной. Рассмотрены современные программы для численного моделирования тепловых процессов обрабатываемых диэлектрических материалов в микроволновых установках. Представлены результаты проведения численного моделирования в программе ANSYS HFSS тепловых процессов в стержневых материалах, которые нагревались в микроволновых установках на основе электродинамических систем в виде круглого волновода и в виде круглого диафрагмированного волновода.

Представлены модель и метод расчёта специализированных электродинамических систем для формирования заданного распределения температуры в стержневом композитном материале. В качестве модели микроволновой установки на основе различных конструкций электродинамических систем для нагрева полимерных композиционных материалов в виде стержней выбрана нагруженная длинная линия с граничными условиями. Для выбора граничных условий использовано предположение о том, что мощность источника микроволнового излучения полностью поглощается обрабатываемым материалом стержня на длине электродинамической системы.

Метод расчёта распределения температуры в обрабатываемом материале основан на следующих основных положениях:

1. Диэлектрические параметры полимерных композиционных обрабатываемых материалов линейно имеют линейную зависимость от изменения температуры материала на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц;

2. Выбранная конструкция электродинамической системы микроволновой установки обеспечивает равномерное распределение температуры по объему обрабатываемого материала в непрерывном режиме;

3. Стержень из полимерного композиционного материала движется и отверждается в трубе из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями, что позволяет пренебречь отдачей тепла в окружающее пространство.

Эти положения дают возможность рассчитать распределение температуры материала без учёта процессов тепломассопереноса.

Представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований воздействия микроволнового излучения на отверждение стержневых полимерных композиционных материалов. Экспериментальные исследования были проведены на микроволновых установках с различными конструкциями электродинамических систем на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. В качестве электродинамических систем использовались: круглый волновод; прямоугольный волновод; прямоугольный волновод, свернутый в виде меандра; замедляющие системы в виде круглого диафрагмированного волновода и в виде спирали, а также на основе сочетания волноводных и замедляющих систем. Расхождение рассчитанных и измеренных распределений температуры по длине и по поперечному сечению материала стержня в микроволновых установках не превышало 5%.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований определены оптимальные конструкции микроволновых установок для равномерного нагрева диэлектрических стержней различных диаметров. Для равномерного нагрева стержней малого диаметра (4-12мм) наиболее целесообразно использовать микроволновые установки с электродинамической системой в виде прямоугольного волновода свернутого в виде меандра. Для равномерного нагрева стержней диаметров 20-40мм наиболее целесообразно использовать последовательно соединенные микроволновые установки с электродинамической системой волноводного типа, например, круглого волновода и в виде замедляющей системы, например, в виде круглого диафрагмированного волновода. Отклонение экспериментальных значений температуры стержня из полимерного композиционного материала от номинального значения температуры +180°С по длине и по поперечному сечению материала стержня в микроволновых установках не превышало 7%.

Рассмотрены современные программы для численного моделирования тепловых процессов обрабатываемых диэлектрических материалов в микроволновых установках. Проведено сравнение программ "Microwave Office" и "ANSYS HFSS". Показано, что наиболее полно отвечала поставленным задачам в научно-исследовательской работе программа "ANSYS HFSS". В результате проведения численного моделирование в программе "ANSYS HFSS":

- рассчитана длина электродинамической системы в виде круглого волновода (1400мм) для микроволновой установки, на которой материалом стержня поглощается 97% энергии микроволнового излучения;

- рассчитана длина электродинамической системы в виде круглого диафрагмированного волновода (900мм) для микроволновой установки, на которой материалом стержня поглощается 97% энергии микроволнового излучения;

- получена зависимость распределения температуры по поперечному сечению полимерного композиционного материала стержня после прохождения двух последовательно соединенных микроволновых установок, как на основе электродинамических систем в виде круглого волновода и на основе круглого диафрагмированного волновода. Отклонение рассчитанной температуры стержня от номинального значения температуры материала стержня +180°С не превышало 10%;

- получены зависимости скорости изменения температуры по длине материала стержня в стационарном режиме. Рассчитаны характеристики распределения температуры для микроволновых установок с электродинамическими системами в виде круглого и диафрагмированного волноводов как вдоль оси стержня, так и на поверхности материала стержня.

Показано, что результаты численного моделирования тепловых процессов подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

Представлены экспериментальные результаты воздействия микроволнового излучения на физико-механические характеристики различных диэлектрических материалов. Показано модифицирующее действие микроволнового излучения на различные диэлектрические материалы, при этом изменялась внутренняя структура, возрастала плотность и прочность полученных изделий. Приведены результаты экспериментальных исследований воздействия микроволнового излучения на термореактивные эпоксидные смолы и полимерные композиционные материалы на их основе с различными наполнителями в зарубежных и отечественных научных публикациях. Показано, что воздействие микроволнового излучения на полимерные композиционные материалы на основе связующего в качестве термореактивных эпоксидных смол приводит к повышению прочностных характеристик. Представлены экспериментальные результаты воздействия микроволнового излучения на плотность термореактивных эпоксидных смол в зависимости от степени равномерности их нагрева. Показано, что чем равномернее распределение температуры по объёму термореактивного эпоксидного связующего, тем выше плотность получаемого материала. Установлено, что плотность отвержденного термореактивного полимерного связующего при использовании микроволнового излучения выше, чем при традиционных методах отверждения.

Если предположить, что с увеличением плотности материала улучшаются их физико-механические характеристики, то надо искать пути реализации таких микроволновых технологических процессов при которых обрабатываемый полимерный композиционный материал нагревается равномерно по всему объёму.