

## ПРЕПРИНТ

### На тему: «Оптимизация процесса получения терморепактивных пенопластов»

Аннотация: В работе исследована возможность оптимизации процесса получения легких терморепактивных пенопластов на основе эпоксидных и эпокси-бензоксазиновых композиций с использованием терморасширяющихся микросфер. Показано, что применение твердых эпоксидных смол и оптимальное распределение микросфер позволяет снизить экзотермический эффект и предотвратить перегрев изделия при одностадийном формовании. Разработан технологический режим отверждения, обеспечивающий получение материалов с регулируемой плотностью (80–300 кг/м<sup>3</sup>) и прочностью на сжатие до 6,5 МПа. Введение антипирена триглицидилфосфата в эпокси-бензоксазиновую пену позволило достичь класса горючести V-0.

#### Введение

Современные аэрокосмические и строительные технологии предъявляют повышенные требования к теплоизоляционным и конструкционным материалам, сочетающим низкую плотность, высокие механические показатели и огнестойкость. Терморепактивные пенопласты на основе эпоксидных и бензоксазиновых связующих, модифицированных вспенивающими микросферами, являются перспективным решением данной задачи. Однако их широкое применение сдерживается сложностью синхронизации процессов гелеобразования смолы и вспенивания, что может приводить к перегреву и неоднородности структуры. Целью данного исследования являлась разработка и оптимизация составов и режимов получения таких пенопластов с контролируемыми свойствами.

Методы и материалы  
В качестве полимерных матриц использовали жидкую эпоксидную смолу ЭД-20, твердую эпоксидную смолу DER671 и синтезированный безрастворным методом бензоксазин на основе бисфенола-А, ДЭТДА и параформальдегида. Вспенивающими агентами служили терморасширяющиеся микросферы марок DU638 для эпокси-бензоксазиновых композиций и DU180 для эпоксидных систем. В состав для повышения огнестойкости эпокси-бензоксазиновых пенопластов вводили триглицидилфосфат. Процессы отверждения и вспенивания изучали методами дифференциальной сканирующей калориметрии и термомеханического анализа. Оптимизацию температурно-временного режима проводили с помощью программного комплекса Netzsch Thermokinetics 3. Механические испытания на сжатие выполнены в

соответствии с ГОСТ 23206-2017. Оценку горючести проводили с помощью ГОСТ 28157 –2018 образцов пен с антипиреном и без него.

Основные результаты:

1. Кинетика процессов: ДСК-анализ подтвердил необходимость согласования температурных областей отверждения связующего и расширения микросфер для одностадийного процесса. Применение твердых эпоксидных смол позволяет снизить тепловыделение реакции примерно в два раза по сравнению с жидкими аналогами, что предотвращает термическую деградацию материала.
2. Оптимизация состава: Установлено, что микросфера DU638 демонстрирует максимальную степень расширения в эпокси-бензоксазиновых композициях, а DU180 обеспечивает лучшее межфазное сцепление в эпоксидной матрице. Повышение концентрации микросфер способствует рассеиванию тепла за счет испарения растворителя внутри микросфер.
3. Механические свойства: Варьирование соотношения компонентов позволяет целенаправленно регулировать плотность (80–300 кг/м<sup>3</sup>) и прочностные характеристики пенопластов. Максимальная прочность на сжатие 6,5 МПа и модуль упругости 245 МПа достигнуты для состава с равным массовым содержанием компонентов по 20% содержание микросфер и плотностью 295 кг/м<sup>3</sup>.
4. Огнестойкость: Сравнительный анализ горючести показал, что эпокси-бензоксазиновые пены с добавкой ТГФ относятся к классу V-0 с сохранением внутренней структуры материала, в то время как составы без антипирена активно поддерживают горение.

Заключение

Проведенные исследования позволили разработать составы и одноступенчатый режим получения терморезистивных пенопластов на основе эпоксидных и эпокси-бензоксазиновых связующих с использованием вспенивающихся микросфер. Ключевыми факторами, предотвращающими перегрев, являются применение твердых эпоксидных смол и оптимизированное содержание микросфер. Полученные материалы обладают регулируемым комплексом механических свойств и, при введении антипирена, высокой пожаробезопасностью, что делает их перспективными для применения в авиационной промышленности и строительстве в качестве легких теплоизоляционно-конструкционных элементов. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение долговечности и стабильности свойств разработанных пенопластов в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: термореактивные пенопласты, эпоксидные смолы, бензоксазин, вспенивающиеся микросферы, одностадийное формование, прочность на сжатие, огнестойкость.