

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР НА ТЕРМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

***Аннотация.** Представлены результаты исследования влияния углеродных наноструктур (астраленов) на термическую стабильность и морфологию эпоксидных огнезащитных вспучивающихся составов (ОВС), применяемых для защиты конструкций объектов нефтегазохимического комплекса. Методами термогравиметрического анализа (ТГА) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) исследованы образцы покрытий, модифицированные астраленами в концентрациях 0,1 и 0,2 % об., до и после криогенного воздействия. Установлено, что введение астраленов способствует формированию более однородной микроструктуры покрытия и повышает его термическую стабильность, что выражается в увеличении выхода коксового остатка на 28% для образца с 0,2% об. астраленов. Криогенное воздействие приводит к увеличению шероховатости и росту микротрещин, однако модифицированные составы демонстрируют лучшую сохранность структуры. Наибольшая эффективность модификатора наблюдалась при концентрации 0,2 % об. Результаты работы показывают перспективность использования углеродных наноструктур для создания высокоэффективных огнезащитных полимерных композитов, устойчивых к комплексному воздействию экстремальных температур.*

Введение. Развитие нефтегазохимического комплекса сопряжено с эксплуатацией объектов, характеризующихся высокими пожарными рисками и наличием криогенных сред, таких как сжиженный природный газ [1]. Обеспечение пожарной безопасности металлических конструкций на таких объектах является критически важной задачей. Одним из наиболее эффективных способов защиты является применение огнезащитных вспучивающихся составов (ОВС) на основе эпоксидных смол, сочетающих хорошие адгезионные и защитные свойства [2]. Однако традиционные эпоксидные ОВС могут проявлять недостаточную стойкость к резким термическим и криогенным воздействиям, что приводит к растрескиванию и отслоению покрытий [3, 4].

Перспективным направлением решения данной проблемы является модификация полимерной матрицы углеродными наноструктурами (УНС) [5]. В отличие от других УНС, например, многостенных углеродных нанотрубок, астралены демонстрируют высокую стабильность физико-химических свойств, что делает их предпочтительными модификаторами для создания композиционных материалов с программируемыми характеристиками. «Нанокомпозитный подход», заключающийся во введении

наноразмерных добавок в традиционные материалы, позволяет принципиально улучшить их эксплуатационные свойства, в частности, термическую стабильность и механическую прочность.

Целью настоящей работы являлось исследование влияния астраленов, введенных в эпоксидный ОВС, на микроструктуру и термическую стабильность покрытий в условиях, моделирующих аварийные воздействия на объектах нефтегазохимии, включая криогенное охлаждение.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования использовался серийный эпоксидный ОВС «ТЕРМОБАРЬЕР-2» (ООО НПК «ОгнеХимЗащита»). Модификация состава проводилась путем введения углеродных наноструктур типа «астрален» в систему отвердителя. Технология приготовления модифицированных образцов включала этап ультразвукового диспергирования астраленов в отвердителе в течение 15 минут при температуре 40 °С для обеспечения равномерного распределения наночастиц и стабильности суспензии. Были приготовлены образцы с концентрацией астраленов 0,1 и 0,2 % об. Образцы наносились на стальные пластины Ст3 размером 100×50×6 мм. Для моделирования аварийного воздействия часть образцов подвергалась криогенной обработке путем полного погружения в жидкий азот на 10 минут.

Для исследования были отобраны 6 ключевых образцов, характеристики которых представлены в Таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения и параметры исследуемых образцов

Обозначение	Концентрация Astr, % об.	Криогенное воздействие
ТБ 2	0	Нет
ТБ 2 А	0	Да
ТБ 2 Astr 0,1	0,1	Нет
ТБ 2 Astr 0,1 А	0,1	Да
ТБ 2 Astr 0,2	0,2	Нет
ТБ 2 Astr 0,2 А	0,2	Да

Термическая стабильность образцов изучалась методом термогравиметрического анализа (ТГ). Анализ проводился в интервале температур от 50 до 800 °С в воздушной среде. Фиксировались температуры начала основных тепловых эффектов и масса коксового остатка при 800°С.

Исследование микроструктуры поверхности покрытий проводилось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на сканирующем зондовом микроскопе «NTEGRA SPECTRA». Анализировались такие параметры, как шероховатость поверхности, длина и ширина микротрещин, максимальный и средний перепад высот.

Результаты. Результаты ТГ демонстрируют значимое влияние астраленов на термическое поведение эпоксидного ОВС. Основные количественные данные ТГ сведены в Таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты термогравиметрического анализа исследуемых образцов

Образец	Темп. нач. 1-го эффекта, °С	Темп. нач. 2-го эффекта, °С	Темп. нач. 3-го эффекта, °С	Остаточная масса при 800°С, %
ТБ 2	157	292	581	31
ТБ 2 А	154	287	584	41
ТБ 2 Astr 0,1	120	296	573	40
ТБ 2 Astr 0,1 А	100	273	574	22
ТБ 2 Astr 0,2	126	248	587	59
ТБ 2 Astr 0,2 А	159	292	582	26

Анализ данных показывает, что введение астраленов оказывает комплексное влияние на процесс термического разложения. Наибольший выход коксового остатка (59%) зафиксирован для образца ТБ 2 Astr 0,2, что на 28% выше, чем у немодифицированного аналога ТБ 2 (31%). Это свидетельствует о значительном повышении термической стабильности полимерной матрицы за счет введения наномодификатора. Астралены, обладая высокой теплопроводностью, способствуют перераспределению тепловой энергии в объеме материала, интенсифицируя процессы структурообразования и карбонизации, что приводит к формированию более термостабильного пенококсового слоя.

После криогенного воздействия (ТБ 2 Astr 0,2 А) выход коксового остатка снижается до 26%, однако разница с обработанным немодифицированным составом (ТБ 2 А, 41%) требует дополнительного исследования. Можно предположить, что криогенное воздействие индуцирует внутренние напряжения в модифицированной полимерной матрице, что меняет механизм ее термического разложения.

Смещение температур начала тепловых эффектов у модифицированных образцов указывает на изменение кинетики термической деструкции. В частности, снижение температуры начала первого эффекта у образцов ТБ 2 Astr 0,1 и ТБ 2 Astr 0,2 может быть связано с ускоренной дегидратацией и началом процессов вспучивания под каталитическим влиянием наночастиц.

Обсуждение. Полученные данные позволяют сделать вывод о синергетическом влиянии углеродных наноструктур на свойства эпоксидного ОВС. С технологической точки зрения, ключевым преимуществом астраленов является возможность их эффективного диспергирования в компонентах композиции с получением стабильных суспензий, что не требует кардинальной перестройки существующих технологических процессов нанесения лакокрасочных материалов.

Заключение. 1. Методами ТГ установлено положительное влияние углеродных наноструктур на термическую стабильность и микроструктуру эпоксидного огнезащитного состава «ТЕРМОБАРЬЕР-2».

2. Установлена перспективность применения технологии ультразвукового диспергирования астраленов для модификации эпоксидных ОВС с целью создания новых полимерных композиционных материалов с повышенной огнезащитной эффективностью и стойкостью к экстремальным температурным воздействиям для объектов нефтегазохимического комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2024 № 4146-р «Об утверждении развития Стратегии пространственного развития РФ на период до 2030 г. С прогнозом до 2036г».
2. Мавлович А. В., Дринберг А. С., Машляковский Л. Н. Огнезащитные вспучивающиеся лакокрасочные покрытия. – М. : ЛКМ-пресс, 2018. – 488 с.
3. Карякина М.И. и др. Исследование атмосферостойкости огнезащитных вспучивающихся покрытий // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4 (ч. 3). – С. 571–574.
4. Копылов П.С. и др. Оценка поведения огнезащитных покрытий в поле температур от –162 до +1300°C // Инженерно-физический журнал. – 2020. – Т. 98, № 1. – С. 54–61.
5. Иванов А.В. и др. Модификация тонкослойных огнезащитных покрытий многослойными углеродными нанотрубками: физико-технологические принципы и методика применения для объектов трубопроводного транспорта // Пожаровзрывобезопасность / Fire and Explosion Safety. – 2019. – Т. 28. – №. 5. – С. 39–50.

УДК 543.632.54

Лаптик И.О., Прокопчук Н.Р.

(Белорусский государственный технологический университет)

ВЛИЯНИЕ ЗАРЯДА ПОВЕРХНОСТИ НАНОЧАСТИЦ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭПОКСИДНОЙ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИИ

Нами развивается гипотеза о решающей роли заряда поверхности наночастиц в формировании надмолекулярной структуры и свойств наномодифицированных полимерных композитов [1]. В данной работе впервые представлены результаты о влиянии наночастиц различной природы на долговечность эпоксидных электроизоляционных покрытий.

Полимерные материалы на основе эпоксидных смол широко применяются при создании различных устройств и конструкций [2].