

УДК 678.5

Исследование механических свойств связующего и углепластика на основе эпоксидной смолы, модифицированной полиэфирсульфонами

Макагонов Иван Александрович

makagonov.iv.a@bmstu.ru

SPIN-код: 1300-8082

Чаплина Екатерина Сергеевна

chaplina03@bk.ru

SPIN-код: 9525-1496

Шакирова Альбина Рафаэлевна

shakirovaar@bmstu.ru

SPIN-код: 2291-3919

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Подобраны составы модифицированных эпоксидных смол с различными марками полиэфирсульфонов (ПЭС-210К, ПЭС-230-2К, ПЭС-240К, ПЭС-250К). Отработаны режимы модификации и отверждения при малом объеме компонентов. Изготовлены препреги с концентрациями полиэфирсульфонов 2,5 %, 5 %, 10 %, 15 %. Рассмотрено влияние полиэфирсульфонов на свойства эпоксидной смолы 828 CSC, отвержденной ангидридным отвердителем Изо-МТГФА. Изготовлены образцы ПКМ из однонаправленной углеткани методом ручной выкладки.

Ключевые слова: эпоксидное связующее, углепластик, термопласт, полиэфирсульфон, композиционные материалы

Investigation of Mechanical Properties of Binder and Carbon Fiber Based on Epoxy Resin Modified with Polyethersulfones

Makagonov Ivan Alexanderovich

makagonov.iv.a@bmstu.ru

SPIN-code: 1300-8082

Chaplina Ekaterina Sergeevna

chaplina03@bk.ru

SPIN-code: 9525-1496

Shakirova Albina Rafaelefna

shakirovaar@bmstu.ru

SPIN-code: 2291-3919

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. The compositions of modified epoxy resins with various grades of polyethersulfones (PES-210K, PES-230-2K, PES-240K, PES-250K) are selected. Modification and curing modes are worked out with a small volume of components. Prepregs with concentrations of polyethersulfones are produced 2.5 %, 5 %, 10 %, 15 %. The effect of polyethersulfones on the properties of epoxy resin 828 CSC cured with Iso-MTHFA anhydride hardener is considered. Samples of polymer composite materials are made from uni-directional carbon fiber and binder by lay-up method.

Keywords: epoxy binder, carbon plastic, thermoplastic, polyethersulfone, composite materials

Введение. Композиционные материалы на основе эпоксидных связующих благодаря высокой прочности, низкой плотности, стабильным физико-механическим свойствам являются ключевым компонентом многих отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая отрасль, автомобилестроение, судостроение и производство ветроэнергетических установок.

Их основное преимущество заключается в высокой вариативности состава, что позволяет целенаправленно нивелировать недостатки отдельных компонентов за счет синергетического эффекта или введения тиксотропных добавок, регулирующих реологические свойства. Одними из существенных недостатков эпоксидных полимеров, ограничивающим их применение в высоконагруженных конструкциях, являются сравнительно низкая сопротивляемость сжатию и хрупкость [1]. Решение этой комплексной проблемы возможно путем модификации полимерной матрицы суперконструкционными термопластичными полимерами, которые способны существенно повысить ударную вязкость и прочность [2].

Цель настоящей работы заключается в комплексном исследовании механических и деформационных свойств эпоксидной смолы 828 CSC, наполненной полиэфирсульфонами, а также в оценке влияния данной модификации на характеристики получаемых на ее основе полимерных композиционных материалов.

Методы и материалы. В работе исследовались образцы на основе эпоксидной смолы 828 CSC, модифицированной различными марками полиэфирсульфона (ПЭС): ПЭС-210К, ПЭС-230-2К, ПЭС-240К, ПЭС-250К, которые различаются молекулярной массой, химической структурой и, как следствие, эксплуатационными характеристиками [3]. Перед введением в эпоксидную смолу был подготовлен термопластичный наполнитель, находящийся в порошкообразном состоянии. Для обеспечения максимальной гомогенизации раствора эпоксидную смолу предварительно разогревали для снижения ее вязкости, что способствовало лучшему распределению наполнителя в дисперсионной среде. Предварительно был проведен реологический анализ модифицированных связующих для определения режимов переработки.

В качестве армирующего материала была выбрана однонаправленная углеткань CWUD 300 [4], обеспечивающая анизотропию свойств конечного композита. Технология изготовления опытных образцов ПКМ включала метод ручной формовки, что позволило добиться увеличения адгезионного взаимодействия между армирующей и матричной фазами материала и оптимального распределения связующего в композиционном материале. Механические характеристики полимерной матрицы были определены с помощью серии стандартизированных испытаний: на изгиб (в соответствии с ГОСТ Р 56805–2015), сжатие (ГОСТ 4651–2014) и растяжение (ГОСТ 11262–2017). Все испытания проводились на универсальных испытательных машинах при комнатной температуре, а результаты представляют собой среднее арифметическое значение для пяти образцов каждого типа.

Для оценки характеристик композиционного материала проведены испытания на растяжение по основе и утку (ГОСТ Р 56785–2015), сдвиг по основе (ASTM D 3846–08), изгиб по основе и утку (ГОСТ Р 56805–2015), сжатие по основе и утку (ГОСТ Р 33519–2015), а также трещиностойкость по основе (ASTM D 5528) для оценки сопротивления расслоению.

Заключение. В результате проведенной работы было исследовано влияние различных марок суперконструкционных термопластов на прочностные и деформационные свойства эпоксидного связующего. Экспериментальным путем были определены рациональные массовые доли каждого полиэфирсульфона в составе, обеспечивающие максимальный упрочняющий эффект. Установлено, что введение ПЭС приводит к формированию двухфазной структуры, что способствует эффективному торможению и ветвлению трещин, существенно повышая трещиностойкость композита.

На основе проведенного комплексного анализа, включавшего реологические, прочностные и морфологические исследования, был разработан состав модифицированной эпоксидной смолы. Ключевым достижением является то, что полученный материал обладает не только улучшенными механическими свойствами, но и необходимыми реологическими характеристиками (вязкостью и тиксотропией), что делает его пригодным для изготовления композитов широко распространенными в промышленности методами, такими как вакуумная инфузия и ручное формование.

Были изготовлены и испытаны образцы модифицированного связующего и полимерных композиционных материалов (ПКМ). В ходе исследований было установлено количественное влияние типа и концентрации полиэфирсульфона на ключевые механические характеристики.

Для готового ПКМ модификация позволила значительно повысить межслойную прочность (на 15–30 % в зависимости от марки ПЭС) и сопротивление усталости, что напрямую связано с улучшением вязкости разрушения матрицы. Полученные данные подтверждают эффективность выбранного подхода к модификации и открывают перспективы для создания новых высокоэффективных композиционных материалов с заданным комплексом свойств для применений в ответственных конструкциях.

Работа выполнена в рамках программы государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций (Центр НТИ «Цифровое материаловедение: новые материалы и вещества» при МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Список источников

- [1] Третьяков И.В., Вяткина М.А., Черевинский А.П. и др. Влияние полиэфирсульфона на свойства эпоксидного связующего и намоточных стеклопластиков на его основе. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*, 2021, т. 85, № 8, с. 1132–1136. <https://doi.org/10.31857/S0367676521080317>
- [2] Storozhuk I.P., Bulkatov D.P., Khina A.G. et al. Development of Polyethersulfones for Modification of Epoxy Resins. *Polym. Sci. Ser. B*, 2024, vol. 66, pp. 514–523. <https://doi.org/10.1134/S1560090424601481>

-
- [3] Терешков А.Г., Турин Ф.Г., Бородулин А.С., Нелюб В.А. Методика оптимизации технологии изготовления препрега на основе термопластичного полимера. *Химическая промышленность сегодня*, 2022, № 5, с. 34–41. https://doi.org/10.53884/27132854_2022_5_34
- [4] Dzhangurazov E.B., Petrova T.V., Shapagin A.V., Tretyakov I.V., Korokhin R.A., Kireynov A.V., Alexeeva O.V., Solodilov V.I., Yurkov G.Y., Berlin A.A. Fracture Toughness of Winding Carbon Plastics Based on Epoxy Matrices and Reinforced by Polysulfone Film. *Polymers*, 2025, vol. 17, art. no. 220. <https://doi.org/10.3390/polym17020220>