

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО КОНДЕНСАТОРА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО УГЛЕПЛАСТИКА

Шевченко В.О.

vadimshef2003@gmail.com

Научный руководитель: Л. М. Амирова, д.х.н., профессор
(Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань)

Аннотация

В работе представлены результаты разработки и исследования структурного конденсатора на основе углеткани и стеклоткани с модифицированным эпоксидным связующим. Целью исследования являлось получение многофункционального композита, совмещающего несущую способность и свойства накопителя энергии. Для этого были подготовлены составы связующего на основе эпоксидной смолы DER671 с различным содержанием и характером распределения графитового наполнителя (ГЛ-1). Методом электростатического напыления связующее наносилось на армирующие ткани с последующей консолидацией пакета в вакуумном мешке и отверждением. Проведены комплексные испытания полученных образцов на прочность (растяжение, сжатие) и электроемкостные характеристики (ёмкость, тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрическая проницаемость, пробивное напряжение). Установлено, что градиентное распределение графита в электродных слоях позволяет достичь оптимального баланса механических и электрических свойств: прочность на растяжение 543 МПа, ёмкость 75 нФ, низкий $\tg\delta$ (0,015). Разработана технологическая схема изготовления элемента конструкции (интерцептора) из полученного материала методом термопрессования.

Введение

Современные тенденции в авиации и электромобилестроении требуют создания легких и многофункциональных материалов. Концепция структурных конденсаторов, объединяющих функции силового элемента и устройства хранения энергии, является перспективным решением для снижения массы летательных аппаратов и транспортных средств [1, 2]. Ключевой задачей является разработка материала, обеспечивающего высокие механические характеристики (прочность, жесткость) наряду с достаточной электроемкостью и диэлектрической прочностью [3]. Настоящая работа посвящена исследованию влияния концентрации и характера распределения графитового наполнителя в эпоксидном связующем на комплекс свойств структурного конденсатора на основе углеродной и стеклянной тканей.

Материалы

В работе использовались: эпоксидная смола DER671, отвердитель – глутаровый ангидрид, катализатор отверждения – трифенилfosфин. В качестве электропроводящего наполнителя применялся литейный графит марки ГЛ-1. Армирующие материалы: углеткань UMT49-S-EP-12K (электроды) и стеклоткань Т-11 (сепаратор). Токосъёмники – никелевые ленты.

Подготовка составов и изготовление образцов

Были приготовлены три варианта композиции связующего для электродов:

Состав 1: Без наполнителя (эталон).

Состав 2: С равномерным содержанием графита (22,5 мас. ч. на 100 мас. ч. смолы), соответствующем концентрации переколяционного перехода.

Состав 3: С градиентным распределением графита (от 88 до 11 мас. ч. по слоям). Связующее для сепаратора не содержало наполнителя.

Компоненты измельчались и смешивались. Нанесение порошкообразного связующего на заземлённые ткани осуществлялось методом электростатического напыления на установке START 50 с промежуточным оплавлением каждого слоя при 80°C. Формировался пакет: углеткань (электрод) – стеклоткань (сепаратор) – углеткань (электрод). Консолидация проводилась в вакуумном мешке (остаточное давление 5 мбар) при 100°C в течение 20 мин. Отверждение – при 120°C в течение 40 мин.

Методы испытаний

Механические испытания: Статическое растяжение и сжатие на универсальной испытательной машине Instron 5882 по стандартам ASTM D3039 и ASTM D3410.

Электроемкостные испытания: Измерение ёмкости (C) и тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$) с помощью LCR-метра. Диэлектрическая проницаемость (ϵ) рассчитывалась по формуле плоского конденсатора.

Испытание на электрическую прочность: Определение пробивного напряжения при скорости нарастания 1 кВ/с.

Термический анализ: Исследование кинетики отверждения методом ДСК на приборе DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch) при скорости нагрева 5 °C/мин.

Результаты

Механические свойства.

Результаты механических испытаний представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Механические характеристики образцов.

Состав	σ_{tens} МПа	E_{tens} ГПа	σ_{comp} МПа	E_{comp} ГПа
Без графита	752,6±41,3	55,4±3,0	535,1±21,5	54,4±2,7

Графит (22,5)	$270,2 \pm 20,5$	$30,4 \pm 1,8$	$203,1 \pm 16,8$	$26,7 \pm 1,2$
Графит (22,5) м.ч.) градиент	$543,4 \pm 32,1$	$47,8 \pm 3,8$	$438,2 \pm 26,3$	$42,6 \pm 3,8$

Наибольшее снижение прочности (до ~64%) наблюдается у образца с равномерно распределенным графитом из-за создания концентраторов напряжений и нарушения однородности матрицы. Градиентное распределение наполнителя позволяет сохранить до ~72% от эталонной прочности, обеспечивая оптимальный баланс.

Электроемкостные и диэлектрические свойства

Тангенс угла диэлектрических потерь характеризует количество энергии, рассеянное в виде тепла при работе конденсатора в переменном электрическом поле. Определялся с использованием моста Шеринга.

1. Сборка схемы моста Шеринга.

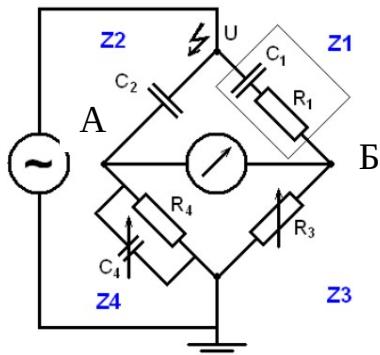


Рисунок 1 - Схема моста Шеринга

Результаты электрических испытаний представлены в Таблице 2, 3.

Таблица 2. Результаты диэлектрических испытаний

Состав	C, нФ	$\operatorname{tg}\delta$	ϵ
Без графита	80 ± 10	$0,08 \pm 0,02$	$12,5 \pm 1,5$
Графит (22,5)	$7 \pm 0,3$	$0,002 \pm 0,0005$	$3,8 \pm 0,3$

Графит (22,5 м.ч.) градиент	75 ± 5	$0,015 \pm 0,003$	$7,2 \pm 0,8$
--------------------------------	------------	-------------------	---------------

Таблица 3. Электро - емкостные характеристики образцов

Состав	C, нФ	Напряжение пробоя, кВ
Без графита	$1,5 \pm 10$	$12,5 \pm 1,1$
Графит (22,5)	$80 \pm 0,3$	$2,8 \pm 0,3$
Графит (22,5 м.ч.) градиент	75 ± 5	$8,4 \pm 0,7$

Образец с градиентным наполнителем демонстрирует ёмкость, сопоставимую с эталоном (без наполнителя), но при этом его тангенс угла потерь в 5 раз ниже. Это свидетельствует о более эффективном накоплении заряда с меньшими энергопотерями. Высокое содержание графита у поверхности электрода увеличивает эффективную площадь, а его уменьшение к сепаратору снижает риск пробоя, что подтверждается высоким пробивным напряжением (13.5 кВ).

Технологический аспект

Разработан и описан полный цикл изготовления: от приготовления порошкового связующего с контролем дисперсности частиц (<100 мкм) до консолидации в вакуумном мешке. Метод электростатического напыления показал высокую эффективность и контроль за содержанием связующего (~60/40 с тканью). На основе полученного материала разработан технологический процесс изготовления интерцептора крыла методом термопрессования консолидированных пластин.

Заключение

1. Разработана и апробирована технология получения структурного конденсатора на основе модифицированного эпоксидного связующего и углеткани с использованием метода электростатического напыления.
2. Экспериментально установлено, что равномерное введение графита в количестве 22.5 мас. ч. приводит к резкому снижению механической прочности (на 64%) при незначительном росте ёмкости.
3. Предложена и реализована стратегия градиентного распределения графита в электродных слоях. Показано, что данный подход позволяет достичь оптимального компромисса свойств: сохранение до 72% от исходной механической прочности, высокая удельная ёмкость (75 нФ) и низкий тангенс угла диэлектрических потерь (0.015).
4. Полученный материал и отработанная технология являются основой для создания многофункциональных силовых элементов авиационной техники, сочетающих несущую способность и функцию накопления энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carlson, T., Asp, L. E., Åkermo, M., & Sjögren, A. (2010). Structural capacitor materials made from carbon fibre epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 70(7), 1135-1140.
2. O'Brien, D. J., Baechle, D. M., & Wetzel, E. D. (2011). Design and performance of multifunctional structural composite capacitors. *Journal of Composite Materials*, 45(26), 2797-2809.
3. Carlson, T., & Asp, L. E. (2013). Structural carbon fibre composite/PET capacitors—Effects of dielectric separator thickness. *Composites Part B: Engineering*, 49, 16-21.
4. Todoroki, A., Tanaka, Y., Hirano, Y., & Ueda, M. (2014). Electrical shorting between the carbon-fiber cloth electrodes of structural capacitors with a glass-fiber cloth separator. *Open Journal of Composite Materials*, 4(3), 140-147.

5. Li, S., Liang, G., Yan, C., & Zhang, Q. (2015). Preparation and characterization of epoxy/carbon fiber composite capacitors. *Polymer Composites*, 36(8), 1447-1453.
6. Todoroki, A., Kobayashi, N., Suzuki, Y., & Ueda, M. (2016). Effect of Degree of Cure on Sandwich Structural Capacitor Using Ion-Conductive Polymer with Carbon Fabric Skins. *Open Journal of Composite Materials*, 6(04), 112.
7. Shen, Z., & Zhou, H. (2017). Mechanical and electrical behavior of carbon fiber structural capacitors: Effects of delamination and interlaminar damage. *Composite Structures*, 166, 38-48.