

УДК 620.186

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/130/26>

АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ УГЛЕРОДНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ СКАНИРОВОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

©Осекова Г. А., ORCID: 0009-0003-7847-0002, SPIN-код: 5555-2769, Ошский технологический университет им. М. М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан, Gul_532@mail.ru
©Шайдуллаев Р. Б., ORCID: 0000-0002-5444-4235, SPIN-код: 2434-9582, канд. техн. наук, Институт природных ресурсов Южного отделения НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан, shrb63@mail.ru
©Идирус уулу Д., ORCID: 0009-0006-2537-9135, Институт природных ресурсов Южного отделения НАН КР, г. Бишкек, Кыргызстан, damirbeki@mail.ru

ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE OF CARBON-POLYMER COMPOSITES USING SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

©Osekova G., ORCID: 0009-0003-7847-0002, SPIN code: 5555-2769, Osh Technological University named after M. Adyshev, Osh, Kyrgyzstan, Gul_532@mail.ru
©Shaydullaev R., ORCID: 0000-0002-5444-4235, SPIN code: 2434-9582, Ph.D., Institute of Natural Resources Southern Branch of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, shrb63@mail.ru
©Idiris uulu D., ORCID: 0009-0006-2537-9135, Institute of Natural Resources Southern Branch of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan, damirbeki@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются основные этапы синтеза углеродно-полимерных композитных материалов на основе резоль-фенолформальдегидной смолы и их микроструктурные особенности. Морфология матрицы, армирующего материала и межфазных зон анализировалась на основе данных сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Была определена взаимосвязь между пористостью, механической прочностью и адгезионными свойствами материала. Изучены характеристики коксовых структур, полученных пиролизом, и их влияние на общие свойства композита.

Abstract. The main stages of the synthesis of carbon-polymer composite materials based on resol-phenol-formaldehyde resin and their microstructural features are considered in this article. Morphology matrix, reinforcing phase and interphase zone are analyzed based on scanning electron microscopy (SEM) data. The relationship between porosity, mechanical strength and adhesive properties of the material is established. The characteristics of coke structures obtained by pyrolysis and their influence on the general properties of the composite are studied.

Ключевые слова: углеродно-полимерный композит, СЭМ-анализ, резольная смола, кокс, микроструктура, межфазная зона, пористость, термореактивность.

Keywords: carbon-polymer composite, SEM analysis, resol resin, coke, microstructure, interphase zone, porosity, thermoreactivity.

Композитные материалы занимают особое место в современной материаловедении. Среди них углеродно-полимерные композиты широко используются благодаря своим уникальным свойствам — высокой механической прочности, химической стабильности и термостойкости.

Эти материалы играют важную роль в авиационной, машиностроительной, химической промышленности и экологической фильтрации [1, 2].

Предыдущие исследования показали, что особенно перспективным является сочетание матрицы на основе фенолформальдегидной смолы (резольного типа) с коксовыми наполнителями. Такая система образует трехмерную решетчатую структуру в результате реакции поликонденсации, что придает ей высокие полезные свойства [3, 4].

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) позволяет изучать внутреннюю микроструктуру материала на нанометровом уровне. Этот метод является незаменимым инструментом для определения качества адгезии, характера и распределения дефектов, а также характера пористости на границе раздела между матрицей и армирующим материалом [5].

Цель данной статьи — описать этапы синтеза углеродно-полимерного композита на основе резольной смолы и систематически проанализировать микроструктурные данные, полученные с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Материалы и методы

В исследовании использовались следующие материалы: матрица - фенолформальдегидная смола резольного типа (фенол: формальдегид = 1 : 1,5–2,0; катализатор — NH_4OH , pH = 8–9); наполнитель - диспергированный коксовый порошок на основе нефтяного кокса (размер частиц <50 мкм, высушен при 105°C); чистота реагентов - аналитически чистые (А.П.) и технически чистые (Т.П.).

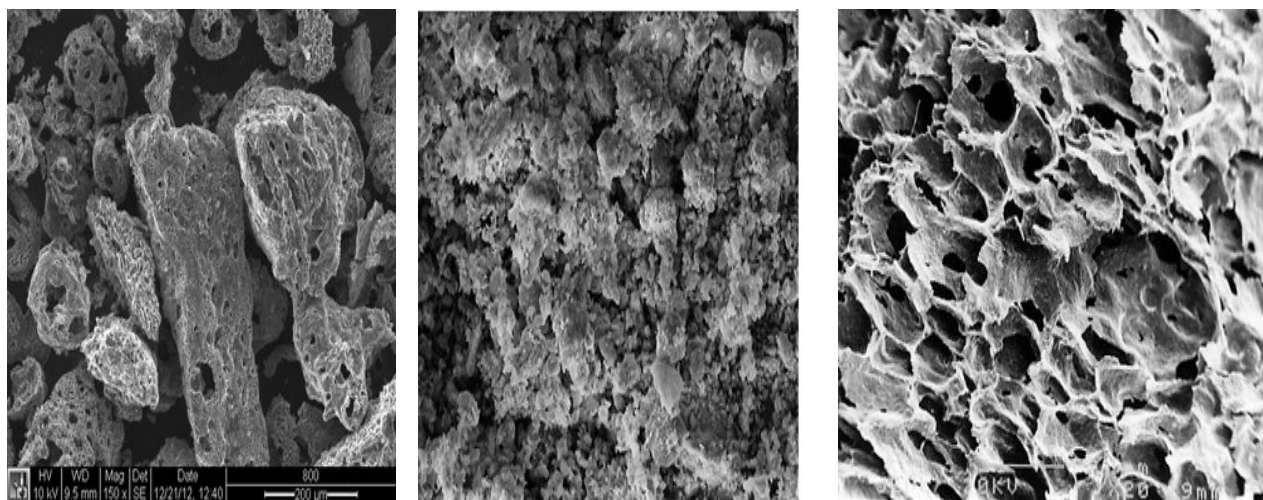


Рисунок 1. Порошок нефтяного кокса (вид с помощью сканирующего электронного микроскопа)

Этапы синтеза и приготовления. Установлено, что синтез углеродно-полимерного композита состоит из четырех основных этапов.

Этап 1: Синтез резольной смолы. Фенол и формальдегид вступают в реакцию условной поликонденсации в присутствии катализатора NH_4OH . Реакция завершается образованием жидкой олигомерной структуры. На уровне СЭМ на этом этапе материал представляет собой однородную жидкость, и кристаллическая структура еще не сформирована.

Шаг 2: Подготовка коксового наполнителя. Нефтяной кокс измельчают в шаровой мельнице до размера частиц < 50 мкм и сушат при 105 °С. Анализ с помощью сканирующего электронного микроскопа показывает, что частицы кокса обладают высокой пористостью и развитой поверхностью. Такая морфология создает благоприятные условия для образования адгезионной связи с матрицей.

Этап 3: Компаундирование. В смолу добавляют порошок кокса (20–40 мас.%) и интенсивно перемешивают в механическом смесителе. Цель – достижение однородного распределения наполнителя в матрице . Изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, показывают, что частицы кокса равномерно распределены в матрице смолы.

Этап 4: Формование и термореактивизация. Смесь заливают в форму при температуре 130–150 °С и под давлением. Происходит реакция поликонденсации, превращающая линейный олигомер в трехмерную решетчатую структуру (сетевую структуру). В результате образуется твердый черный монолитный материал. Этот этап является наиболее важным, определяющим механические и термические свойства материала.

Метод анализа с помощью сканирующего электронного микроскопа. Микроструктуру материалов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа. Образцы заливали эпоксидной смолой, шлифовали и покрывали электропроводящим слоем методом углеродного напыления. Увеличение варьировалось от $\times 100$ до $\times 10\,000$. Интерпретацию изображений проводили путем отдельного анализа матрицы, армирующего материала и межфазной зоны.

Анализ структурных компонентов с помощью сканирующего электронного микроскопа. Анализ изображений, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, подтверждает, что композитный материал состоит из трех основных структурных компонентов: матрицы, армирующего материала и межфазной зоны.

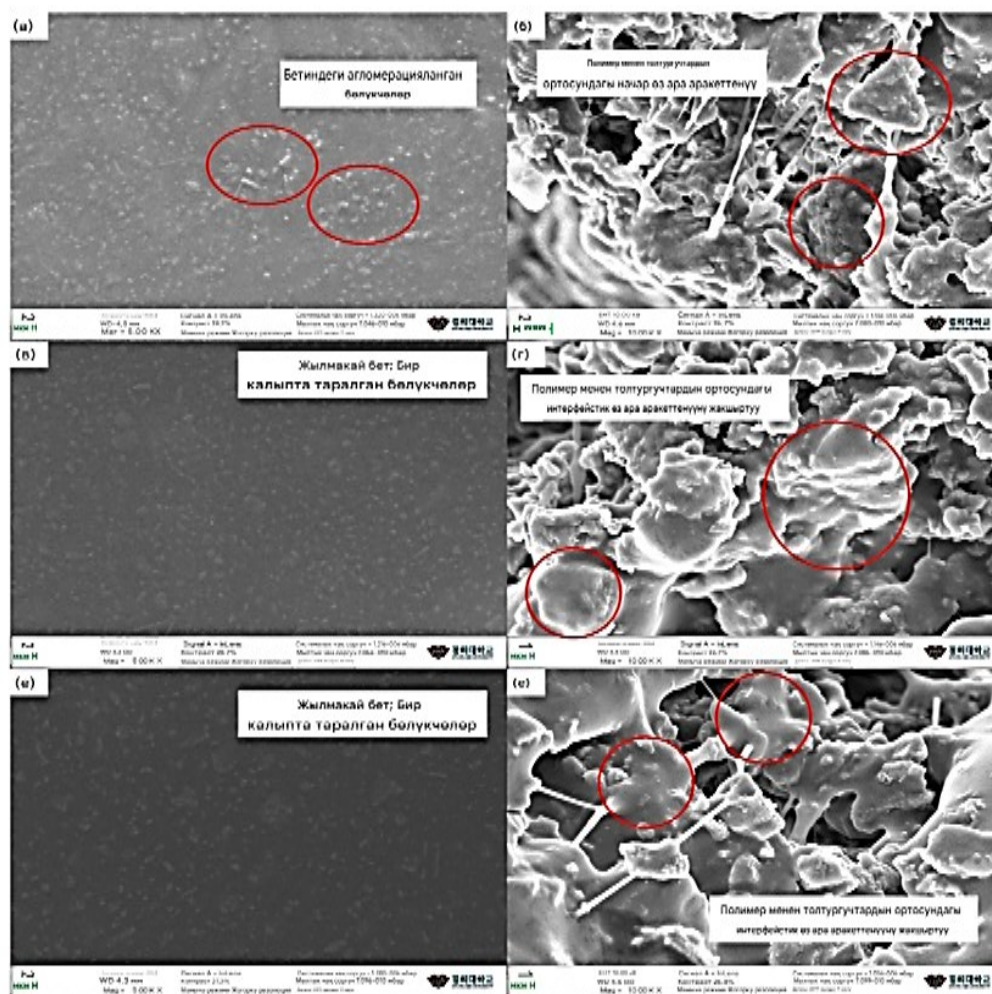


Рисунок 2. Микроструктура композита (матрица + частицы кокса)

Матрица (полимерная фаза). На изображениях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), матрица выглядит как плоский или однородный фон. После термореактивизации полимер образует плотную изотропную структуру. Завершение реакции поликонденсации подтверждается отсутствием пустот в матрице (Рисунок 2).

На изображениях, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, частицы кокса наблюдаются как четко выраженная дисперсная фаза. Их морфология характеризуется острыми краями, неправильной формой и большой развитой поверхностью. Равномерное распределение частиц в матрице подтверждает успешность этапа гомогенного компаундирования (Рисунок 3, 4).

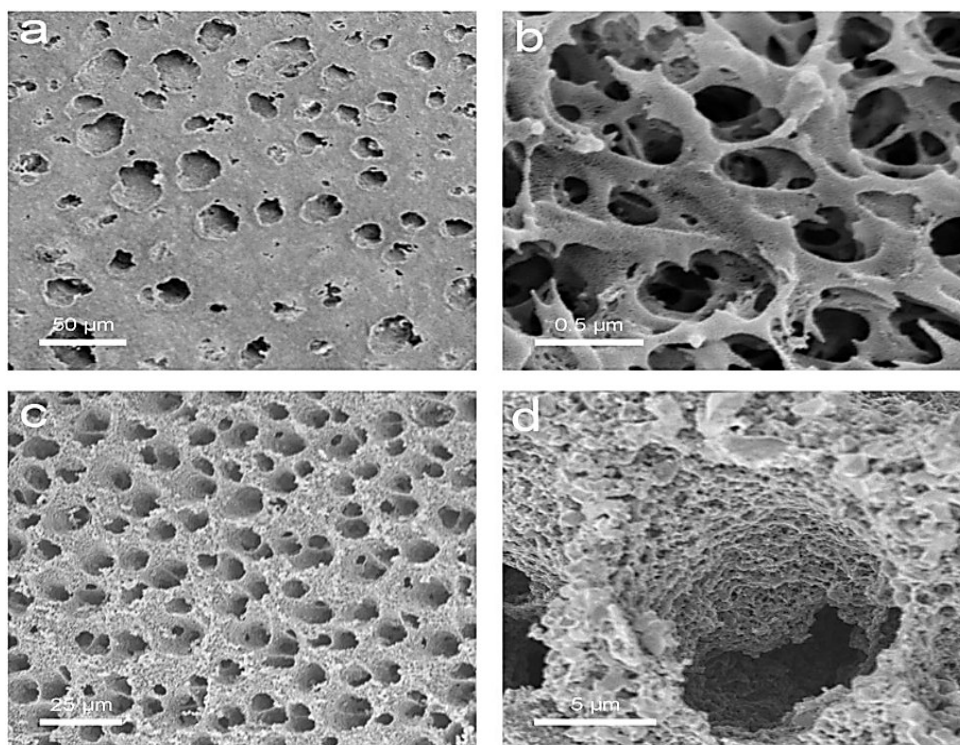


Рисунок 3. Пористая структура кокса

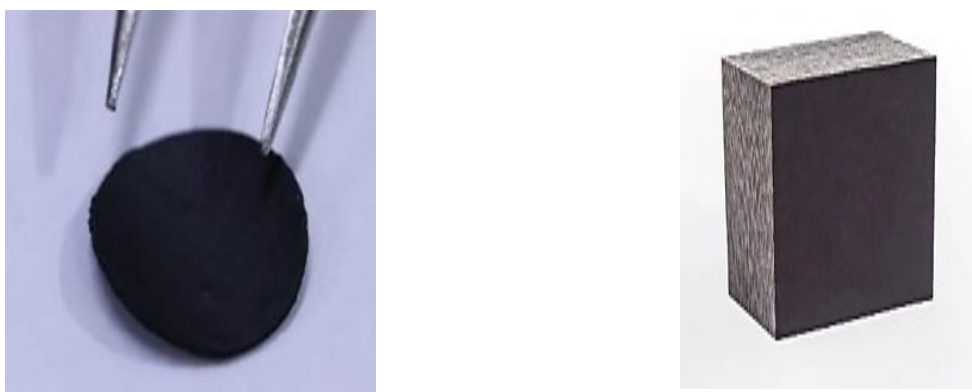


Рисунок 4. Готовый углеродно-полимерный композит

Граница раздела между частицами кокса и матрицей является наиболее важной зоной, определяющей механические свойства материала. Анализ с помощью сканирующего электронного микроскопа показал, что адгезия в зоне контакта в целом хорошая — отсутствуют признаки расслоения между матрицей и армирующим материалом. Качество

морфологии зоны контакта напрямую влияет на общие механические свойства. С помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) в материале был выявлен ряд дефектов. Наиболее важными из них являются: микротрещины образуются из-за внутренних напряжений в процессе термореактивного формования; микропустоты (поры) образуются в результате выделения газа в процессе синтеза; расслоение — это локальное разделение зоны контакта между матрицей и арматурой; локальное ухудшение адгезии происходит из-за неравномерности на стадии компаундирования.

Небольшое количество дефектов и их размер, остающийся в микрометровом диапазоне, свидетельствуют о том, что технология синтеза была применена правильно. Анализ коксового материала, полученного методом пиролиза, с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) выявил губчатую, сильно пористую структуру. Размеры микропор находятся в диапазоне 1–50 мкм. Такая морфология обеспечивает большую площадь поверхности — и, следовательно, высокую сорбционную способность. Однако с увеличением пористости наблюдается тенденция к снижению механической прочности материала. Это несоответствие создает необходимость оптимизации концентрации наполнителя в зависимости от практического применения.

Анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с высоким увеличением показал, что морфология поверхности полимерно-углеродной матрицы изменяется в зависимости от стадий модификации. Внутренняя структура на наномасштабе демонстрирует кристаллографическую решетку углеродных слоев. Кроме того, в некоторых образцах были обнаружены округлые структуры, характерные для микросфер кокса, полученных из каменноугольной смолы путем термической обработки (термолиза). Эти микросферы являются ценным наполнителем для специальных высокотехнологичных углеродно-углеродных композитов: они лучше локализуются в матрице, чем порошок кокса, и значительно повышают механическую прочность.

Заключение

Была определена оптимальная технологическая схема синтеза углеродно-полимерного композита на основе резольной смолы: синтез смолы → получение кокса → компаундирование → термореактивизация. Анализ с помощью сканирующего электронного микроскопа подтвердил гетерогенную структуру материала, состоящую из матрицы, армирующего материала и межфазной зоны. Подтверждено, что качество адгезии в зоне контакта является основным фактором, определяющим общие механические свойства материала. Высокая пористость пиролизного кокса улучшает фильтрационные и сорбционные свойства, но важно учитывать, что это увеличение пористости приводит к снижению механической прочности. Использование микросфер кокса улучшает равномерное распределение наполнителя в матрице и повышает качество материала. Полученные результаты демонстрируют необходимость дальнейших исследований углеродно-полимерных композитов как перспективных материалов, обладающих высокой механической и термической стабильностью, а также хорошими сорбционными свойствами.

Список литературы

1. Карлин В. А., Петров И. Н. Углерод-полимерные композитные материалы: структура и свойства. М.: Химия, 2020. 312 с.
2. Иванов С. В. Применение СЭМ для исследования полимерных матриц // Журнал технической физики. 2021. Т. 91, № 4. С. 145–152.

3. Смит Д. А., Браун Т. М. Углерод-полимерные композиты: механизмы межфазной адгезии // Наука и технология композитов. 2019. Т 178. С. 45–53.
4. Абдыракунов М. Т. Кокс с наполнителем фенол композиты тепловое стабильность // Кыргызстан Науки. 2022. №2. С. 88–95.
5. Романова Е. К., Соколов Д. Ю. Сканирующая электронная микроскопия в материаловедении: методическое руководство. СПб.: Политехнический институт, 2018. 224 с.

Список литературы

1. Karlin, V. A., & Petrov, I. N. (2020). Uglerod-polimernye kompozitnye materialy: struktura i svojstva. Moscow. (in Russian).
2. Ivanov, S.V. (2021). Primenenie SEHM dlya issledovaniya polimernyh matric. *Zhurnal tehnichej fiziki*, 91(4), 145–152. (in Russian).
3. Smit, D. A., & Braun, T. M. (2019). Uglerod-polimernye kompozity: mehanizmy mezhfaznoj adgezii. *Nauka i tehnologiya kompozitov*, 178, 45–53. (in Russian).
4. Abdyrakunov, M. T. (2022). Koks s napolnitelem fenol kompozity teplovoe stabil'nost'. *Kyrgyzstan Nauki*, (2), 88–95. (in Russian).
5. Romanova, E. K., & Sokolov, D. Yu. (2018). Skaniruyushchaya ehlektronnaya mikroskopiya v materialovedenii: metodicheskoe rukovodstvo. St. Petersburg. (in Russian).

Поступила в редакцию
14.06.2026 г.

Принята к публикации
26.06.2026 г.

Ссылка для цитирования:

Осекова Г. А., Шайдуллаев Р. Б., Идирис уулу Д. Анализ микроструктуры углеродно-полимерных композитов методом сканировочной электронной микроскопии // Бюллетень науки и практики. 2026. Т. 12. №9. С. 238-243. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/130/26>

Cite as (APA):

Osekova, G., Shaydullaev, R., & Idiris uulu, D. (2026). Analysis of the Microstructure of Carbon-Polymer Composites using Scanning Electron Microscopy. *Bulletin of Science and Practice*, 12(9), 238-243. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/130/26>