

## Синтез и применение наноструктурированных композитных волокон

З.А. Мансуров<sup>1,2</sup>, Б.Б. Кайдар<sup>1,2\*</sup>, А.А. Имаш<sup>1,2</sup>, Э. Енсеп<sup>1,2</sup>,  
Ж.Т. Кули<sup>3,4</sup>, Г.Т. Смагулова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Казахстанско-Британский технический университет, ул. Толе би, 59, Алматы, Казахстан

<sup>4</sup>Лаборатория инженерного профиля, Satbayev University, ул. Сатпаева, 22 а, Алматы, Казахстан

### АННОТАЦИЯ

Глобальный экологический кризис выделил насущную необходимость улучшения средств отслеживания и анализа параметров окружающей среды. В данном контексте газовые датчики, играющие важную роль в оценке качества воздуха, постоянно развиваются с целью повышения точности и эффективности обнаружения вредных веществ. Эти изыскания направлены на получение углеродных волокон, модифицированных наночастицами оксида металла, для создания материалов с высокой газочувствительностью. Перспективным соединением для этих целей является оксид NiO, который может быть эффективно синтезирован методом жидкофазного горения. Этот метод прост и позволяет точно контролировать структуру и свойства продукта, что дает возможность адаптировать его к конкретным требованиям и обеспечить высокую эффективность и точность обнаружения. Установлено, что углеродные волокна, модифицированные наночастицами оксида никеля, полученные методом жидкофазного горения и имеющие средний размер кристаллитов 48 нм, обладают чувствительностью к ацетону 73 %. Анализ газовой чувствительности материала показал положительные результаты, свидетельствующие о высокой чувствительности образца к газообразному ацетону и химической стабильности.

*Ключевые слова:* наночастицы NiO, метод жидкофазного горения, электроспиннинг, композитные волокна, газовый сенсор.

### 1. Введение

Электроспиннинг представляет собой широко применяемый метод синтеза нано- и микродисперсных волокон [1]. Одним из ключевых аспектов данного метода является выбор полимера, влияющего на морфологические и структурные свойства синтезируемых волокон [2]. В то время как полиакрилонитрил является наиболее распространенным полимером для синтеза углеродных волокон [3], каменноугольный пек привлекает внимание в качестве альтернативного прекурсора благодаря своим уникальным характеристикам.

Каменноугольный пек, получаемый в результате процесса карбонизации угля, содержит высокомолекулярные полициклические ароматические углеводороды [4], а также обладает высоким

содержанием углерода [5]. Помимо этого, каменноугольный пек доступен из-за низкой стоимости и широко распространен в нашем регионе. Использование каменноугольного пека в качестве альтернативного прекурсора при синтезе углеродных волокон методом электроспиннинга является актуальным и перспективным направлением в области нанотехнологий и материаловедения. Однако применение каменноугольного пека при формировании волокон методом электроспиннинга имеет некоторые трудности, в частности высокая вязкость раствора, которая может негативно влиять на стабильное формирование струи. В данном исследовании представлены результаты по оптимизации процесса электроспиннинга с использованием каменноугольного пека в качестве добавки к полиакрилонитрилу.

Газовые сенсоры – это химические датчики, способные обнаруживать присутствие определенных типов газов [6]. На протяжении веков для обнаружения различных газов использовались различные технологии, включая полупроводниковые, каталитические, электрохимические, оптические и акустические датчики. Эффективность каждого датчика зависит от нескольких характеристик, включая чувствительность, селективность, предел обнаружения, время отклика и время восстановления. Принцип работы газовых сенсоров основан на полупроводниковых свойствах материала. Они работают по принципу обратимого процесса адсорбции газа на поверхности газочувствительного материала [7], что приводит к изменению электрического сопротивления устройства.

Необходимость доступных, высокочувствительных и избирательных сенсоров является актуальной для мониторинга окружающей среды и контроля качества воздуха. В последние годы исследователи проявляют значительный интерес к разработке сенсоров и сенсорных систем, основанных на композитных волокнах, благодаря их потенциалу для селективного и быстрого обнаружения различных газов [8-10]. Сенсоры химических веществ уже широко применяются в различных отраслях промышленности, таких как энергетика, робототехника, транспорт, медицина, сельское хозяйство, экология и др.

В настоящее время сенсоры, использующие металлоксидные полупроводники в качестве базового материала, представляют собой одни из наиболее популярных газовых датчиков благодаря своей высокой чувствительности, простоте производства и экономической выгоде [11]. Работа этих газовых сенсоров основана на изменении сопротивления чувствительного слоя при взаимодействии с молекулами газа в процессе их адсорбции и десорбции. Нанодисперсные металлоксиды рассматриваются как перспективные материалы для улучшения процесса обнаружения газов за счет высокой поверхностной активности, пористости и наличия улучшенных активных центров. Эти характеристики способствуют более эффективной адсорбции газа и, следовательно, улучшению характеристик обнаружения. Метод электроспиннинга представляет собой оптимальный и простой способ создания наноматериалов и их композитов.

Механизм чувствительности к газам у металлоксидных полупроводников n-типа основан на поверхностных окислительно-восстановитель-

ных реакциях [12]. В данном случае атмосферный кислород извлекает электроны из зоны проводимости поверхностного слоя, образуя отрицательно заряженные ионы кислорода. Это уменьшает концентрацию электронов и, соответственно, увеличивает сопротивление. Воздействие восстановительных газов приводит к возвращению электронов, что снижает сопротивление. Однако у металлоксидных полупроводников p-типа наблюдается противоположное поведение. Перспективные газочувствительные наноматериалы на основе углеродных волокон обычно обладают недостаточной скоростью восстановления. Для повышения эффективности таких газочувствительных материалов предлагается декорировать углеродные волокна полупроводниками металл-оксидного типа, как n-типа, так и/или p-типа. Эти модификации приводят к увеличению поверхностной площади материала, что улучшает его проводимость и создает новые активные центры.

Данная работа может быть полезной для исследователей в области электроспиннинга газовых сенсоров на основе оксидов металлов, особенно оксида никеля, в полимерных углеродных волокнах.

Интеллектуальные системы на основе газовых сенсоров стремительно вошли в повседневную жизнь и находят все большее применение в приложениях, связанных со здоровьем и безопасностью, таких как медицинская диагностика, мониторинг качества атмосферного воздуха, пищевая промышленность и обнаружение токсичных/воспламеняющихся и взрывоопасных газов, а также контроль ограниченных выбросов. Эти и другие применения в жестких промышленных условиях требуют разработки быстрых, чувствительных, селективных, надежных и недорогих сенсоров. Настоящее исследование направлено на создание таких портативных газоанализаторов на основе наноматериалов.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Материалы

Для синтеза композитных волокон на основе полиакрилонитрила, каменноугольного пека и оксида никеля были использованы следующие материалы: каменноугольная смола (Шубаркольское месторождение, Казахстан) [13]; полиакрилонитрил (ПАН, молекулярная масса 150 000 г/моль, DFL Minmet Refractories Corp.); диметилформа-

мид (ДМФ,  $(\text{CH}_3)_2\text{NC}(\text{O})\text{H}$ , 99,9 %, Sigma Aldrich); гексагидрат нитрата никеля ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ); мочевины ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ ); поливинилиденфторид (ПВДФ).

## 2.2. Получение композиционных волокон ПАН/КУП/NiO методом электроспиннинга

### 2.2.1. Синтез каменноугольных пеков (КУП) методом термической обработки

Термообработку проводили в трубчатой печи с кварцевым реактором диаметром 6 см. Каменноугольную смолу (КУС) помещали в реактор и нагревали до температуры 400 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин и выдерживали 60 мин [14].

### 2.2.2. Синтез наночастиц оксида никеля NiO

Для синтеза наночастиц оксида никеля использовали гексагидрат нитрата никеля ( $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) в качестве окислителя и мочевины ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ ) в качестве топлива. Реагенты полностью растворяли в дистиллированной воде, затем выпаривали до объема 5-7 мл, после выпаривания смесь нагревали до 260 °С [14].

### 2.2.3. Получение углеродных волокон, модифицированных NiO

Были получены композиционные волокна на основе ПАН/КУП с добавлением частиц оксида никеля. Для этого изначально готовили 9 % волокнообразующий раствор ПАН, который растворяли в ДМФ при постоянном перемешивании в течение 5 ч со скоростью перемешивания 500 об/мин при температуре 80 °С, более подробное описание методики раскрыто в работе [15].

### 2.2.4. Исследование газочувствительных свойств полученных волокон (C/NiO)

Для исследования газочувствительных свойств материала тонкую пленку из углеродной суспензии наносили на микрочип из встречно-штыревых золотых нанопроволок с двумя электродами, закрепленными на оксиде алюминия [15]. Отклик сенсора определяли по формуле:

$$R = \frac{(I_a - I_g)}{I_g}$$

где:  $I_a$  – ток сенсора на воздухе;  $I_g$  – ток сенсора в среде ацетона.

## 3. Результаты и их обсуждение

### 3.1. Исследование морфологических и физико-химических характеристик каменноугольных пеков, полученных термической обработкой

В данной работе использовали каменноугольную смолу Шубаркольского угольного месторождения, расположенного в Казахстане. Месторождение Шубарколь обладает значительными запасами, составляющими 1,5 миллиарда тонн. Сама по себе каменноугольная смола характеризуется как густая темная жидкость с характерным запахом, имеющая вязкость 1,04 г/см<sup>3</sup>.

Образцы каменноугольной смолы были подвергнуты контролируемому нагреву при различных температурных интервалах, а изменение массы было строго оценено путем измерения веса образцов до и после обработки. Полученные данные обобщены на рис. 1, который дает представление о степени уменьшения массы после каждой обработки. Данные, приведенные в таблице на рис. 1, показывают, что пик снижения массы приходится на температурный порог 500 °С, составляя примерно 76 % от первоначальной массы. Применение термической обработки ускоряет удаление летучих компонентов из субстрата каменноугольной смолы.

Представленные данные по термообработке каменноугольной смолы полезны для понимания ее химической трансформации при повышении температуры. Значительная потеря массы, наблюдаемая при 500 °С, свидетельствует о значительном удалении летучих фракций. Это очень важно для материалов, предназначенных для дальнейших высокотемпературных обработок, таких как карбонизация. Особенно значительным является удаление серы из композиции при 400 °С. Сера может быть нежелательной в углеродных материалах, так как она приводит к образованию примесей и может влиять на конечные свойства углеродных материалов.

Снижение содержания летучих веществ и удаление серы при более высоких температурах увеличивает потенциал карбонизации материала, что является положительным результатом для производства высококачественных углеродных материалов. Удаление летучих компонентов обеспечивает большую структурную стабильность при повышенных температурах, что благоприятно для областей применения, требующих термостойкости.

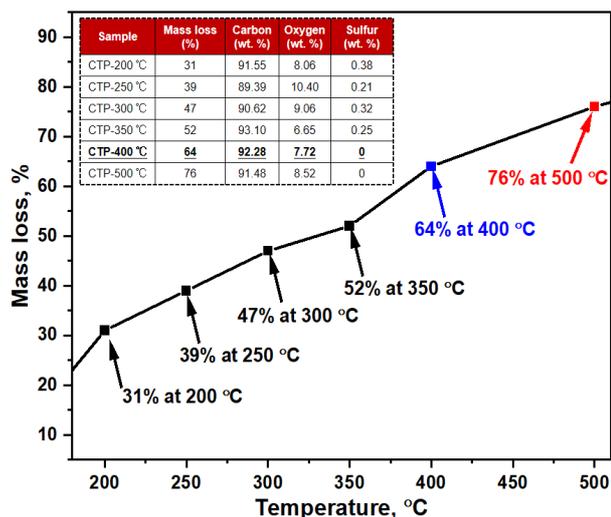


Рис. 1. Потеря массы и элементный состав каменноугольной смолы после термообработки.

Анализ СЭМ-изображений выявил значительные структурные изменения в образцах каменноугольной смолы, подвергнутых различным температурам обработки. При начальной температуре обработки 200-250 °С заметные преобразования проявляются в виде пористой микроструктуры и инициации активных мезофазных центров. Последующее повышение температуры обработки до 300 °С приводит к выраженному усилению деградации поверхности. Обработанный образец демонстрирует более выраженный рельеф, сопровождающийся повышенной плотностью мезофазных центров на единицу площади. При темпера-

туре обработки 350 °С наблюдается критический переход, свидетельствующий переход от изотропной к анизотропной структурной конфигурации. Примечательно, что этот образец демонстрирует полное удаление летучих фракций, в результате чего образуется однородная поверхность с центрами мезофазы размером в среднем около 2 мкм.

Аналогично, при обработке каменноугольной смолы при 400 °С возникает сопоставимая анизотропная структура, иногда со слоистым расположением. Это структурное изменение совпадает с увеличением степени графитизации образца. Размер частиц мезофазы заметно увеличивается до 3,5-5 мкм. Кульминация экспериментов, основанных на температурном режиме, наступает при температуре переработки каменноугольной смолы при 500 °С, что приводит к окончательному переходу от изотропного к анизотропному структурному состоянию.

На рис. 2 показаны спектры комбинационного рассеяния, полученные из каменноугольной смолы, подвергнутой различным температурным обработкам. Использование Рамановской спектроскопии позволяет оценить влияние температурной обработки на степень графитизации исходной каменноугольной смолы.

В контексте исходного графита два основных пика первого порядка проявляются на длинах волн  $1355\text{ см}^{-1}$  (так называемый пик D, связанный с дефектной Рамановской зоной) и  $1575\text{-}1582\text{ см}^{-1}$  (так называемый пик G, связанный с присутстви-

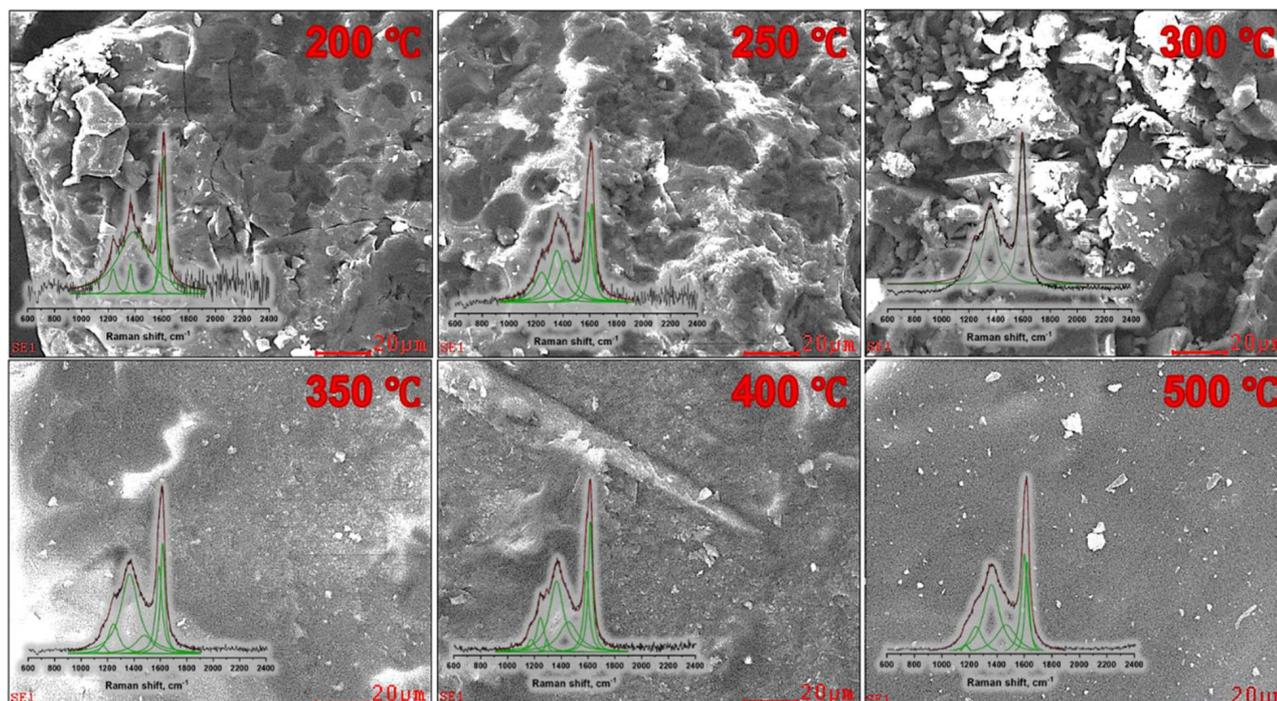


Рис. 2. СЭМ-изображения и Рамановские сдвиги каменноугольной смолы после термообработки.

ем атомов углерода в состоянии  $sp^2$  и расположенный в плоскости решетки графита). В частности, спектральные линии второго порядка в районе  $\sim 2710 \text{ см}^{-1}$  демонстрируют минимальное разрешение и значительный беспорядок, что делает их идентификацию невозможной. Для интерпретации спектров комбинационного рассеяния важны несколько ключевых параметров:  $\lambda D$  и  $\lambda G$  – длины волн пиков D и G, соответственно, измеренные в  $\text{см}^{-1}$ ; ID и IG – интенсивности пиков D и G в относительных единицах; R – отношение интенсивностей пиков D и G (ID/IG). Появление нанокристаллитов графита в образце сопровождается смещением пика G от  $1575\text{-}1582 \text{ см}^{-1}$  к более высоким значениям, около  $\sim 1600 \text{ см}^{-1}$ . Точная интерпретация полуширины и площади пика требует тщательного определения фоновой линии в спектре комбинационного рассеяния.

В образцах, обозначенных КУП-200, КУП-250 и КУП-300, наблюдается смещение пика G в сторону более высоких частот, примерно в диапазоне  $\sim 1405\text{-}1428 \text{ см}^{-1}$ . Это явление можно объяснить присутствием в этих образцах кластеров с уменьшенным числом ароматических колец. В частности, в этих двух образцах присутствует значительный фоновый шум, что затрудняет точное определение степени графитизации. Поэтому значение R, которое показывает соотношение ID/IG, для этих образцов не учитывалось.

Для образца КУП-350 наблюдается значительное изменение как интенсивности, так и положения пиков G и D. Это изменение свидетельствует об удалении всех летучих фракций и начале перехода от неупорядоченного к более упорядоченному структурному состоянию, характеризующемуся образованием мезофазных центров. Кроме того, для образцов КУП-350, КУП-400 и КУП-500 отмечается заметное смещение пика D в область  $1600\text{-}1610 \text{ см}^{-1}$ , что можно объяснить появлением нанокристаллических мезофазных центров.

## 3.2. Характеристика полученных композитных волокон C/NiO

### 3.2.1. Характеристика наночастиц оксида никеля, полученных методом комбустирования раствора

На дифракционной картине РСА мы наблюдаем появление четырех заметных пиков, представленных на вставке рис. 3. Эти пики расположены под углами  $2\theta$   $37,27^\circ$ ,  $43,27^\circ$ ,  $62,84^\circ$  и  $75,42^\circ$ . Важно отметить, что они соответствуют кубиче-

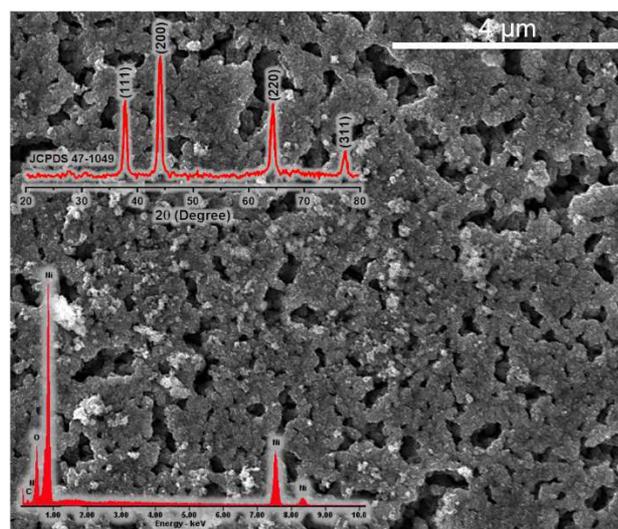


Рис. 3. СЭМ-изображение (с ЭДРС-анализом и РСА) наночастиц NiO.

ским кристаллическим структурам NiO, причем каждый пик исходит из отдельной плоскости дифракции: (111), (200), (220) и (311), соответственно. Стоит отметить, что эти дифракционные пики близко соответствуют ожидаемой картине, определенной в карте JCPDS 47-1049. Следовательно, данные рентгеноструктурного анализа убедительно свидетельствуют о том, что образец в первую очередь состоит из однофазного оксида никеля. Размер кристаллитов оксида никеля, рассчитанный с помощью уравнения Шеррера, составляет примерно  $480 \text{ \AA}$ .

Анализ СЭМ показывает, что наночастицы имеют сферическую морфологию и, что особенно важно, склонны к образованию агломератов. Это явление агрегации, вероятно, обусловлено наноразмерными размерами кристаллитов и наличием многочисленных некомпенсированных поверхностных связей. Высокая поверхностная энергия, присущая нанокристаллам, вынуждает их к агрегации, что является механизмом, направленным на минимизацию поверхностной энергии в процессе синтеза.

Кроме того, мы определили, что удельная поверхность наночастиц NiO составляет  $65,544 \text{ м}^2/\text{г}$ , что является обнадеживающим показателем для оксидных материалов. Для сравнения, в предыдущем исследовании авторов оксид никеля был синтезирован золь-гель методом, что позволило получить значительно меньшую удельную поверхность –  $5,8 \text{ м}^2/\text{г}$ . Это сравнение подчеркивает, что оксид никеля, полученный методом сжигания в растворе, обладает уменьшенной размерностью и повышенной пористостью, что делает его заметным достижением в синтезе материалов.

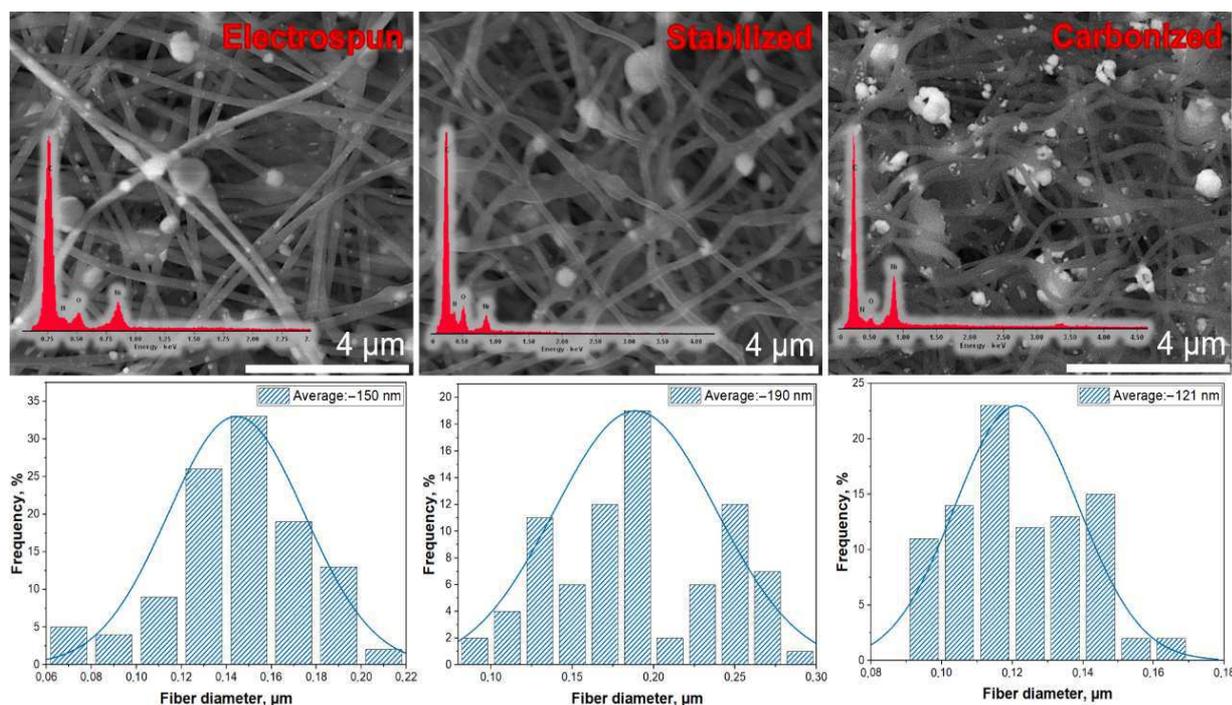


Рис. 4. СЭМ-изображение (с ЭДРС-анализом) и распределение волокон ПАН/КУП/NiO после процессов электроспиннинга, стабилизации и карбонизации.

### 3.2.2. Характеристика волокон ПАН/КУП/NiO

Композитные волокна ПАН/КУП/NiO были методично изготовлены методом электропрядения, после чего прошли тщательно организованную последовательность процессов стабилизации и карбонизации. Как показано на рис. 4, мы представляем комплексное описание, включающее как СЭМ-изображение, так и сопутствующий анализ распределения диаметров электропряденных композитных волокон после критических стадий стабилизации и карбонизации.

Волокна, полученные методом электропрядения, демонстрируют удивительную структурную устойчивость во время последующих процессов термообработки, включая стабилизацию и карбонизацию. Эти критические этапы, включающие высокие температуры и химические превращения, не нарушают целостности электропряденных волокон. Такое сохранение структуры жизненно важно для создания высокоэффективных материалов.

СЭМ-изображения наглядно иллюстрируют успешное включение наночастиц никеля в структуру волокна. Кроме того, на этих изображениях видно образование видимых агломератов на поверхности волокна. Это явление обуславливает уникальные свойства получаемых материалов и подчеркивает эффективность процесса электроспиннинга в обеспечении встраивания наноча-

стиц. Частицы NiO обладают лучшей адгезией к поверхности волокна, поскольку в процессе карбонизации происходят химические и физические изменения, улучшающие адгезию наночастиц NiO к поверхности волокна.

Изменение среднего диаметра волокна на протяжении всего процесса изготовления, от электропрядения (150 нм) до стабилизации (190 нм) и, наконец, до карбонизации (121 нм), может быть обусловлено несколькими факторами. Во время стабилизации повышенная температура вызывает некоторое набухание вследствие сшивания и удаления летучих компонентов. Впоследствии карбонизация приводит к уменьшению диаметра за счет удаления неуглеродных атомов и формирования более плотной графитовой углеродной структуры. Этот динамичный процесс позволяет точно контролировать диаметр волокна и, следовательно, свойства материала для различных применений.

### 3.2.3. Исследование газочувствительных свойств композитных волокон C/NiO

Чтобы определить оптимальную рабочую температуру для композитных волокон, мы провели исследование влияния температуры нагрева на реакцию этих волокон при воздействии 100 ppm тестового газа, а именно ацетона (как показано

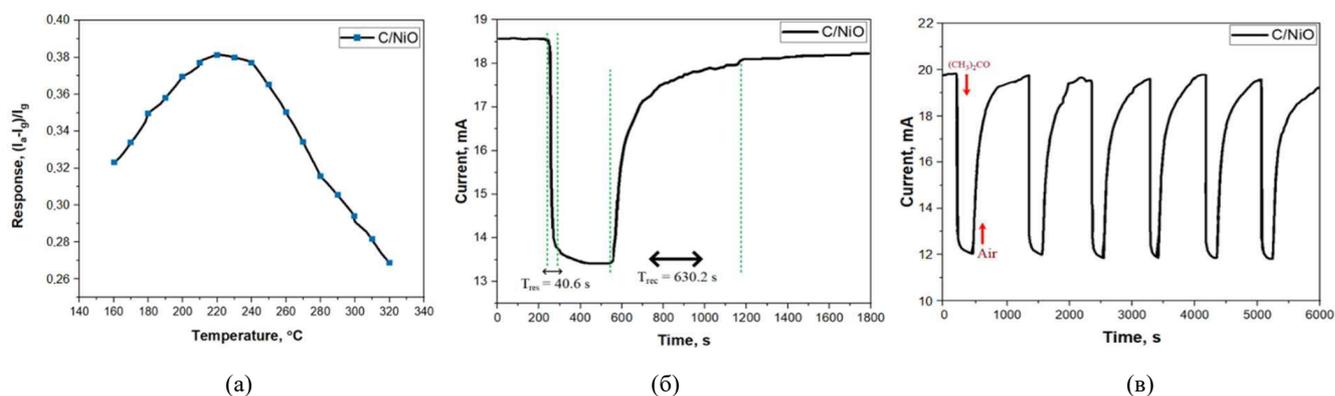


Рис. 5. График зависимости сопротивления от рабочей температуры (а), времени отклика и восстановления (б) и времени работы (в) для газочувствительного материала на основе C/NiO для смеси ацетона и воздуха.

на рис. 5). Наши наблюдения показали, что реакция зависит от температуры. При повышении температуры от 160 °С отклик сенсора постепенно увеличивается, достигая кульминации около 220 °С, а затем быстро снижается при дальнейшем повышении температуры. Такое поведение связано, прежде всего, с воздействием температуры на адсорбированный газ.

В окружающем воздухе молекулы кислорода адсорбируются на поверхности чувствительного материала. При повышении температуры происходит переход от физической адсорбции к химической адсорбции адсорбированного газа. Примечательно, что ионы кислорода, способствующие переносу электронов в адсорбированном газе, могут значительно усилить реакцию в определенном температурном диапазоне. Однако если температура превышает определенный порог, то это может препятствовать адсорбции газа на поверхности чувствительного материала.

На рис. 5 показана реакция композитных волокон на 100 ppm ацетона при оптимальной рабочей температуре. При введении газообразного ацетона в испытательную камеру значение тока сенсора быстро уменьшается, а после прекращения воздействия ацетона происходит увеличение тока сенсора.

Микродисперсные и нанодисперсные частицы оксида никеля известны своими газочувствительными свойствами, однако их чувствительность и время реакции на воздействие газа могут различаться. Как правило, нанодисперсные частицы оксида никеля имеют большую площадь поверхности по сравнению с их микродисперсными аналогами, что наделяет их повышенной способностью обнаруживать и реагировать на воздействие газа. Это преимущество означает более быстрое время реакции и большую чувствительность. Тем

не менее, стоит отметить, что точное сравнение этих двух технологий зависит от таких факторов, как размер частиц, их морфология, распределение и конкретный газ.

По сути, превосходное соотношение площади поверхности к объему, присущее нанодисперсным частицам оксида никеля, обеспечивает повышенные реактивность поверхности и чувствительность к колебаниям концентрации газа. Такая повышенная чувствительность обусловлена большим количеством активных участков, доступных для взаимодействия с молекулами газа. Кроме того, уменьшенный размер нанодисперсных частиц оксида никеля ускоряет диффузию молекул газа к этим активным участкам, что способствует более быстрому времени реакции.

Напротив, микродисперсные частицы оксида никеля обычно имеют меньшую площадь поверхности, что приводит к снижению чувствительности к изменениям концентрации газа. Тем не менее, их применение для обнаружения газов остается ценным благодаря таким факторам, как экономичность, стабильность и простота синтеза по сравнению с их нанодисперсными аналогами.

Необходимо признать, что газочувствительные характеристики микродисперсных и нанодисперсных частиц оксида никеля могут существенно изменяться в зависимости от множества факторов, включая размер частиц, морфологию, кристаллическую структуру, химический состав поверхности, наличие примесей или дефектов поверхности. Следовательно, для окончательного сравнения необходим всесторонний анализ газочувствительных свойств обеих форм оксида никеля.

Согласно принципу действия полупроводников р-типа, таких как NiO, молекулы кислорода, адсорбированные на поверхности, захватывают

электроны из полупроводника, трансформируясь в ионные виды в присутствии воздуха. Это превращение приводит к увеличению основных носителей, что обеспечивает высокие значения тока датчика в окружающем воздухе. Однако газообразный ацетон, являющийся восстановительным газом, при контакте с сенсором инициирует реакцию между восстановительным газом и ионами кислорода на поверхности NiO. Согласно нашим выводам, время реакции и восстановления NiO составляет 40,6 с и 630,2 с, соответственно.

#### 4. Заключение

В заключение статьи можно отметить, что исследования показали значительный потенциал в разработке композитных волокон с использованием каменноугольного пека и функциональных наноматериалов. Термическая обработка пека подчеркивает его важность для экологически чистых высокотемпературных приложений. Синтез наночастиц оксида никеля простым и эффективным методом жидкофазного горения вызывает большой интерес к дальнейшему изучению и совершенствованию данного направления. Успешный синтез композитных волокон, включающих каменноугольный пек и оксид никеля, открывает новые возможности для их использования в экобиологических и промышленных контекстах. Синтезированные волокна обладают газочувствительными свойствами и способствуют устойчивому развитию, предлагая решения для экологических проблем. Разработка таких материалов является примером экологически безопасных технологий, ведущих к более экологичному и устойчивому будущему.

#### Список литературы

- [1]. B. Ksapabutr, M. Panapoy. Metal Oxide-Based Nanofibers and Their Applications. – Elsevier, 2022. – P. 3-30.
- [2]. J.K.Y. Lee, N. Chen, S. Peng, L. Li, L. Tian, N. Thakor, S. Ramakrishna. Polymer-based composites by electrospinning: Preparation & functionalization with nanocarbons // Progress in Polymer Science. – 2018. – Vol. 86. – P. 40-84.
- [3]. S.K. Nataraj, K.S. Yang, T.M. Aminabhavi. Polyacrylonitrile-based nanofibers – A state-of-the-art review // Progress in polymer science. – 2012. – Vol. 37(3). – P. 487-513.
- [4]. P. Basu. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. – Academic press, 2018.

- [5]. V. Bermudez, S. Lukubira, A.A. Ogale. 1.3 Pitch precursor-based carbon fibers. – 2018.
- [6]. M. Tonezzer, L. Van Duy. Encyclopedia of Sensors and Biosensors. – Elsevier, 2023. – P. 185–208.
- [7]. H. Ji, W. Zeng, Y. Li. Gas sensing mechanisms of metal oxide semiconductors: a focus review // Nanoscale. – 2019. – Vol. 11(47). – P. 22664-22684.
- [8]. L. Chen, Q. Yu, Ch. Pan, Y. Song, H. Dong, X. Xie, Y. Li, J. Liu, D. Wang, X. Chen. Chemiresistive gas sensors based on electrospun semiconductor metal oxides: A review // Talanta. – 2022. – Vol. 246. – P. 123527.
- [9]. M. Hajikhani, M. Lin. A review on designing nanofibers with high porous and rough surface via electrospinning technology for rapid detection of food quality and safety attributes // Trends in Food Science & Technology. – 2022. – Vol. 128. – P. 118-128.
- [10]. Y. Si, S. Shi, J. Hu. Applications of electrospinning in human health: From detection, protection, regulation to reconstruction // Nano Today. – 2023. – Vol. 48. – P. 101723.
- [11]. M.V. Nikolic, V. Milovanovic, Z.Z. Vasiljevic, Z. Stamenkovic. Semiconductor gas sensors: Materials, technology, design, and application // Sensors. – 2020. – Vol. 20(22). – P. 6694.
- [12]. A.M. Soleimanpour, A.H. Jayatissa, G. Sumanasekera. Surface and gas sensing properties of nanocrystalline nickel oxide thin films // Applied Surface Science. – 2013. – Vol. 276. – P. 291-297.
- [13]. З.А. Мансуров, Е.К. Онгарбаев, Г.Т. Смагулова, Е. Тилеуберди, М.И. Байкенов, Б.Б. Кайдар. Получение углеродных материалов из каменноугольной смолы и тяжелых нефтяных остатков // Химия в интересах устойчивого развития. – 2021. – Т. 29, № 5. – С. 576-590.
- [14]. Z. Mansurov, G. Smagulova, A. Imash, A. Taurbekov, B. Elouadi, B. Kaidar. Carbon/NiO Compositional Fibers // Eurasian Chemico-Technological Journal. – 2022. – Vol. 24(2). – P. 59-67.
- [15]. B. Kaidar, G. Smagulova, A. Imash, A. Keneshbekova, A. Pyanov, Z. Mansurov. Pitch/Metal Oxide Composite Fibers via Electrospinning for Environmental Applications // Technologies. – 2023. – Vol. 11(6). – P. 156.

#### Reference

- [1]. Ksapabutr B, Panapoy M (2022). Metal Oxide-Based Nanofibers and Their Applications. Elsevier. P. 3-30. ISBN 978-012-82-0629-4.
- [2]. Lee JKY, Chen N, Peng S, Li L, Tian L, Thakor N, Ramakrishna S (2018) Progress in Polymer Science 86:40-84. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.07.002>.

- [3]. Nataraj SK, Yang KS, Aminabhavi TM (2012) *Progress in polymer science* 37(3):487-513. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.07.001>
- [4]. Basu P (2018). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory*. Academic press. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07564-6>
- [5]. Bermudez V, Lukubira S, Ogale AA (2018) 1.3 Pitch precursor-based carbon fibers. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10312-1>
- [6]. Tonezzer M, Van Duy L (2023). *Encyclopedia of Sensors and Biosensors*. Elsevier. P. 185–208.
- [7]. Ji H, Zeng W, Li Y (2019) *Nanoscale* 11(47):22664-22684. <https://doi.org/10.1039/C9NR07699A>
- [8]. Chen L, Yu Q, Pan Ch, Song Y, Dong H, Xie X, Li Y, Liu J, Wang D, Chen X (2022) *Talanta* 246:123527. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2022.123527>
- [9]. Hajikhani M, Lin M (2022) *Trends in Food Science & Technology* 128:118-128. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.003>
- [10]. Si Y, Shi S, Hu J (2023) *Nano Today* 48:101723. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2022.101723>
- [11]. Nikolic MV, Milovanovic V, Vasiljevic ZZ, Stamenkovic Z (2020) *Sensors* 20(22):6694. <https://doi.org/10.3390/s20226694>
- [12]. Soleimanpour AM, Jayatissa AH, Sumanasekera G (2013) *Applied Surface Science* 276:291-297 <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.03.085>
- [13]. Mansurov ZA, Ongarbaev EK, Smagulova GT, Tileuberdi E, Baikenov MI, Kaidar BB (2021) *Chemistry for sustainable development [Khimiya v interesakh ustoichivogo razvitiya]*. 29(5):576-590.
- [14]. Mansurov Z, Smagulova G, Imash A, Taurbekov A, Elouadi B, Kaidar B (2022) *Eurasian Chemico-Technological Journal* 24(2):59-67. <https://doi.org/10.18321/ectj1319>
- [15]. Kaidar B, Smagulova G, Imash A, Keneshbekova, Pyanov A, Mansurov Z (2023) *Technologies* 11(6):156 <https://doi.org/10.3390/technologies11060156>

### Synthesis and application of nanostructured composite fibers

Z.A. Mansurov<sup>1,2</sup>, B.B. Kaidar<sup>1,2\*</sup>, A.A. Imash<sup>1,2</sup>, E. Yensep<sup>1,2</sup>, Zh.T. Kuli<sup>3,4</sup>, G.T. Smagulova<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Combustion Problems, 172 Bogenbay batyr str., Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Al-Farabi Kazakh National University, 71, Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Kazakh-British Technical University, 59 Tole bi str., Almaty, Kazakhstan

<sup>4</sup>Laboratory of Engineering Profile, Satbayev University, 22a Satpayev str., Almaty, Kazakhstan

### ABSTRACT

The global environmental crisis has highlighted the urgent need for improved means of tracking and analyzing environmental parameters. In this context, gas sensors, which play an important role in air quality assessment, are constantly being developed to improve the accuracy and efficiency of detecting harmful substances. This work is aimed at obtaining carbon fibers modified with metal oxide nanoparticles in order to create materials with high gas sensitivity. A promising compound for this purpose is NiO oxide, which can be efficiently synthesized by solution combustion method. This method is simple and allows for precise control of the structure and properties of the product, allowing for customization and high detection efficiency and accuracy. Carbon fibers modified with nickel oxide nanoparticles obtained by solution combustion and having an average crystallite size of 48 nm were found to have a sensitivity to acetone of 73 %. The analysis of gas sensitivity of the material gave positive results indicating high sensitivity of the sample to gaseous acetone and chemical stability.

Keywords: NiO nanoparticles, solution combustion method, electrospinning, composite fibers, gas sensor.

### Наноқұрылымды композитті талшықтардың синтезі және қолданылуы

З.А. Мансуров<sup>1,2</sup>, Б.Б. Кайдар<sup>1,2\*</sup>, Ә.А. Имаш<sup>1,2</sup>, Э. Енсепп<sup>1,2</sup>, Ж.Т. Құли<sup>3,4</sup>, Г.Т. Смагулова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр көшесі, 172, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Қазақстан-Британ техникалық университеті, Төле би көшесі 59, Алматы, Қазақстан

<sup>4</sup>Инженерлік бейінді зертхана, Satbayev University, Сатпаев көшесі, 22а, Алматы, Қазақстан

### АНДАТПА

Жаһандық экологиялық дағдарыс қоршаған ортаның параметрлерін қадағалау мен талдаудың жетілдірілген құралдарының шұғыл қажеттілігін көрсетті. Осы тұрғыда зиянды заттарды анықтаудың дәлдігі мен тиімділігін арттыру үшін ауа сапасын бағалауда маңызды рөл атқаратын газ датчиктері үнемі әзірленуде. Бұл жұмыс газ сезімталдығы жоғары материалдарды жасау үшін

металл оксидінің нанобөлшектерімен модификацияланған көміртекті талшықтарды алуға бағытталған. Осы мақсаттарға арналған перспективті қосылыс NiO оксиді болып табылады, оны сұйық фазалық жану арқылы тиімді синтездеуге болады. Бұл әдіс қарапайым және өнімнің құрылымы мен қасиеттерін нақты бақылауға мүмкіндік береді, бұл оны нақты талаптарға сәйкес келтіруге және анықтаудың жоғары тиімділігі мен дәлдігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Сұйық фазалық жану арқылы алынған және орташа кристал-

лит өлшемі 48 нм болатын никель оксидінің нанобөлшектерімен модификацияланған көміртекті талшықтардың ацетонға сезімталдығы 73 % болатыны анықталды. Материалдың газға сезімталдығын талдау оң нәтиже берді, бұл үлгінің газ тәріздес ацетонға жоғары сезімталдығын және химиялық тұрақтылығын көрсетеді.

Түйінді сөздер: NiO нанобөлшектері, сұйық фазалық жану әдісі, электроспиннинг, композиттік талшықтар, газ сенсоры.