



УДК 541.186.8:621.397.2

МРНТИ 31.17.27

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_37_2_5

Д.О. Мурзалинов^{1,4}, Г. Партизан^{1,2}, В.Ф. Грищенко¹, М.А. Кабдуллин^{3*},
Д.С. Ахметсадык^{1,2}

¹ТОО «Институт ионосферы», г. Алматы, Республика Казахстан

²НАО «Казахский национальный исследовательский университет имени аль-Фараби»,
г. Алматы, Республика Казахстан

³НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.
Сатпаева»,
г. Алматы, Республика Казахстан

⁴ТОО «Физико-технический институт», г. Алматы, Республика Казахстан

¹E-mail: m.kabdullin@satbayev.university*

ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Аннотация. Графен, благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, находит широкое применение в различных областях науки и техники. В данной статье рассматривается использование графена в аэрокосмических технологиях, включая создание легких и прочных материалов, теплоотводящих покрытий, а также перспективы его применения в солнечных панелях, электронных устройствах космических аппаратов и системах защиты от радиации. Расширенный анализ показывает, что интеграция графеновых наноматериалов позволяет значительно улучшить характеристики конструкций, повысить их надежность и устойчивость к экстремальным воздействиям. Экспериментальные исследования, проведенные с использованием метода химического осаждения из паровой фазы, подтверждают эффективность синтеза качественного графена. Данная работа демонстрирует потенциал графена для разработки инновационных аэрокосмических систем, способных обеспечить оптимальное соотношение массы и прочности, а также устойчивость к термическим и механическим нагрузкам. Результаты исследований могут способствовать дальнейшему совершенствованию технологий и расширению практического применения графена в современных аэрокосмических проектах. Полученные данные открывают новые возможности для повышения эффективности конструкций, способствуя развитию передовых методов материаловедения и обеспечивая конкурентное преимущество в аэрокосмической отрасли. Это перспективное направление. Кроме того, статья освещает современные подходы к синтезу графеновых наноструктур, включая одно- и многоэтапные методы, особенности взаимодействия с металлическими подложками и контроль кристалличности. Отдельное внимание уделено вопросам масштабируемости процессов CVD для промышленного применения. Представлены экспериментальные данные по морфологии, теплопроводности и трибологическим характеристикам полученных материалов. Полученные результаты подчеркивают актуальность

разработки функциональных графеновых покрытий для повышения долговечности и энергоэффективности аэрокосмических систем в условиях высоких температур и механических нагрузок.

Ключевые слова: *графен, углеродные наноматериалы, аэрокосмические технологии, теплопроводность, композитные материалы, радиационная защита.*

Введение.

Современные аэрокосмические технологии требуют использования материалов с высокой прочностью, малым весом, устойчивостью к экстремальным условиям и радиации. Графен, как двумерный материал, обладающий высокой электропроводностью, механической прочностью и теплопроводностью, является перспективным кандидатом для решения многих задач в авиации и космосе [1]. В последние годы активно разрабатываются технологии его интеграции в композитные материалы, сенсоры, системы терморегуляции и энергетические устройства. Также графен находит применение в различных аэрокосмических технологиях благодаря своим исключительным свойствам. Одной из ключевых областей использования является создание композитных материалов. Графеновые наноматериалы могут быть использованы для создания легких и прочных структур, применяемых в корпусах самолетов, спутников и космических аппаратов. Такие материалы способны значительно снизить массу конструкции, увеличивая при этом её прочность и устойчивость к механическим нагрузкам [2, 3]. Графеновые композиты также проявляют повышенную стойкость к микрометеоритным ударам, что особенно важно для долговременных космических миссий [4].

Высокая теплопроводность графена делает его отличным материалом для систем терморегуляции в авиации и космосе. Графеновые покрытия способны эффективно рассеивать тепло от двигательных и электронных компонентов, защищая их от перегрева в условиях высоких температур [5, 6]. Эти покрытия могут применяться как для защиты чувствительных приборов, так и для улучшения теплоотдачи от радиаторов терморегулирования на космических станциях.

Еще одной перспективной областью применения графена является солнечная энергетика. Графеновые пленки могут использоваться для создания высокоэффективных солнечных элементов. Их высокая прозрачность и электропроводность позволяют повысить КПД фотоэлементов, что особенно важно для автономных энергетических систем космических аппаратов [7, 8]. Современные исследования показывают, что использование графена в гетероструктурных солнечных батареях может значительно улучшить их долговечность и стабильность работы в условиях космоса [9]. В авиации графеновые суперконденсаторы используются для быстрого накопления и хранения энергии, что особенно важно для бортовых электронных систем.

Графеновые датчики давления и деформации обладают высокой чувствительностью к механическим воздействиям, что делает их идеальными для использования в авиационных и космических технологиях. Они могут применяться для мониторинга состояния летательных аппаратов, измерения давления в топливных системах и контроля механических напряжений в конструкциях спутников и ракет [10]. Обледенение является серьезной проблемой в авиации. Графеновые покрытия обладают высокой теплопроводностью и могут быть использованы для создания эффективных антиобледенительных систем, которые предотвращают образование льда на крыльях и двигателях самолетов [11]. Это позволяет повысить безопасность полетов и снизить затраты на противообледенительные обработки.

Космическая радиация является серьезной проблемой для космических аппаратов и экипажей. Графеновые покрытия обладают способностью экранировать вредное излучение, снижая воздействие высокоэнергетических частиц на оборудование и живые организмы. Эксперименты показывают, что многослойные структуры на основе графена могут

эффективно блокировать и рассеивать радиацию, делая космические миссии более безопасными [12]. В основном методы создания графеновых наноструктур (ГНС) группируются как одно этапные и много этапные [13].

Стратегия одноэтапного синтеза широко используется при получении наноматериалов на основе графена. Основываясь на поддержке графеновых наноллистов и выборе подходящих прекурсоров, кристаллические ядра модифицирующих материалов могут расти *in situ* непосредственно на поверхности или на краю графеновых наноллистов, а затем кристаллические ядра могут далее вырасти в желаемые материалы различных размерностей, включая наночастицы (НЧ): наностержни, нанопластины, наноцветы и т. д. Преимущества одноэтапного метода заключаются главным образом в том, что с его помощью можно без утомительных шагов получить наноматериалы на основе графена, а также в том, что с его помощью можно создавать материалы с высокой кристаллическостью без дополнительных операций [13, 14].

Существует множество одноэтапных методов синтеза наноматериалов на основе графена, включая реакцию гидролиза или пиролиза [15], гидротермальный метод [16], сольвотермический метод [17], метод восстановления *in-situ* [18], химическое осаждение *in-situ*. [19], соосаждение [20] и т.д. Среди этих методов для получения ГНС обычно используются гидротермальный и сольвотермический подходы (поскольку эти методы просты в реализации и позволяют создавать материалы с высокой кристаллическостью).

В работе Жоу и др. [21] однореакторным гидротермальным методом синтезирован наноккомпозит восстановленный оксид графена/ ZrO_2 . Размер НЧ ZrO_2 можно регулировать долей прекурсоров. В недавней статье Мина [22] НЧ CeO_2 диаметром 3,5–4,5 нм были закреплены на наноллистах восстановленного оксида графена для формирования наноккомпозитов с CeO_2 гидротермальным методом. Полученные наноккомпозиты хорошо диспергируются в парафиновом масле в диапазоне температур от $-7\text{ }^{\circ}C$ до $160\text{ }^{\circ}C$, что демонстрирует лучшие износостойкие характеристики, чем отдельные наноллисты графена и наночастицы CeO_2 . Кроме этого, недавно композит оксид графена/полиэтиленгликоля (ОГ/ПЭГ) в качестве добавки на водной основе был получен с помощью одностадийного подхода обработки ультразвуком, в котором ОГ и ПЭГ объединяются в основном за счет водородной связи [22]. Авторами работы [23] разработали новый одноэтапный процесс, в котором графеновые нанохлопья (ГНХ) синтезируются в полете путем разложения метана с использованием горелки с индуктивно-связанной плазмой и равномерно распыляются на подложки из нержавеющей стали со скоростью осаждения 25 мкм/мин. При использовании трибометра «шарик на трех пластинах» коэффициент трения стали с покрытием ГНХ значительно снижается с 0,90 до 0,17 (нагрузка 10 Н), а соответствующая скорость изнашивания снижается примерно в 10 раз по сравнению со сталью без покрытия.

Стратегия многоэтапного синтеза для получения ГНС обычно включает в себя процесс предварительной подготовки и процесс реакции. Эти методы позволяют получать ГНС с идеальным составом и желаемой структурой. Прекурсоры разработанных материалов могут быть предварительно загружены на поверхность графеновых наноллистов. Затем они будут преобразованы в необходимые материалы с помощью последующего процесса реакции для получения наноматериалов на основе графена. Например, Сонг и др. [24] получали композиты MoS_2 /ОГ многоэтапным путем. В их эксперименте молибдат натрия закреплялся и разлагался на MoO_3 на поверхности наноллистов ОГ, а затем MoO_3 можно было дополнительно восстановить и сульфировать с использованием L-цистеина в качестве восстановителя и источника серы для получения композитов MoS_2 /ОГ.

Кроме того, композиты/гибриды на основе графена можно получить путем введения органических молекулярно-модифицированных наноматериалов на поверхность или край графеновых наноллистов. В этом процессе предварительно синтезируются наноматериалы с уникальной структурой и морфологией, а затем они прививаются к графеновым наноллистам посредством физической или химической реакции с использованием соответствующих

органических линкеров. Например, Чжан и др. [25] впервые декорировали нанобемит (AlOOH) 3-глицидоксипропилтриметоксисиланом (ГПТС) для получения ГПТС- AlOOH . Затем ГПТС- AlOOH закрепляли на ОГ с получением наноггибрида ОГ-ГПТС- AlOOH посредством связанной реакции.

В последние годы наиболее распространенными методами синтеза ГНС являются механическое расслоение [26], эпитаксиальный рост [27], восстановление оксида графена [28], химическое осаждение из паровой фазы (CVD) [29-30], и другие. Из этих методов только CVD позволяет как синтезировать, так и наносить графен на большие поверхности, что облегчает его использование в различных приложениях. Однако, хотя графеновые пленки, нанесенные этим способом, имеют высокое качество, использование CVD для крупномасштабного производства сдерживается несколькими факторами: (i) CVD ограничивается несколькими металлическими подложками, (ii) пленка чувствительно к шероховатости поверхности, (iii) сплавы, представляющие промышленный интерес, такие как сталь, не могут выдерживать высокие температуры, необходимые для процесса роста графена методом CVD, (iv) однородность пленки на больших поверхностях ограничивается неоднородностью температуры внутри печи [23].

В методе CVD прекурсоры обычно абсорбируются на поверхности с последующим их пиролизическим разложением, что приводит к образованию центров поглощения на поверхности и способствует росту сплошных тонких пленок [31, 32]. Для CVD графена необходимы предшественники углерода, такие как метан (CH_4), этилен (C_2H_2) или бензол. Прекурсоры разлагаются на атомы углерода при высокой температуре и образуют графитовую структуру из диссоциированных атомов углерода. Для образования графитовой структуры без металлических катализаторов необходима температура выше 2500°C . Для снижения температуры роста до 1000°C переходные металлы действуют как эффективные катализаторы превращения углеводородов в графитовые материалы [33, 34]. Синтез графена методом CVD более подходит, экономически эффективен и возможен для промышленного применения. Недавние исследования были сосредоточены на поиске способа производства графена с помощью метода CVD при температурах ниже 1000°C [35]. Использование низкотемпературного CVD открывает путь к прямому осаждению графена на диэлектрические подложки и является сравнительно надежным и осуществимым методом промышленного применения [36].

Материалы и методы исследования.

В нашей работе за основу синтеза углеродного материала – графена, был взят метод химического осаждения из паровой фазы (CVD). Данный метод, включает в себя разложение углеродных прекурсоров при высоких температурах, адсорбцию атомов газа на подложке и химическую реакцию, приводящую к формированию графеновой пленки. Для синтеза графена применяются различные прекурсоры: метан (CH_4), ацетилен (C_2H_2), этан (C_2H_6) и этилен (C_2H_4). Использование медных и никелевых подложек позволяет контролировать количество слоев графена и его кристаллическую структуру. При этом одним из ключевых факторов является температура реакции: оптимальные условия для получения качественного графена составляют $600\text{--}900^\circ\text{C}$.

Сборка технологической установки для получения графеновых наноструктур для использования в космическом пространстве. В настоящее время метод термического химического осаждения из газовой фазы (ТХОГФ) широко применяется для получения различных типов углеродных наноструктур [13]. Анализ литературных источников показал, что, как правило, эксперименты проводятся при высоких температурах ($700\text{--}1000^\circ\text{C}$). При этом используются различные углеводородные прекурсоры (метан, ацетилен, бензол и др.) чаще всего в сочетании с инертными газами, а также аргон, водород, азот и др.

Нами была отработана методика ТХОГФ (рис.1-4) - синтеза графеновых наноструктур в трехзонной трубчатой печи с диаметром $d = 80$ мм. Установка предназначена для синтеза углеродных наноструктур методом термического химического осаждения из газовой фазы.



Рисунок 1 – Общий вид многофункциональной вакуумной печи OTF-1200X-UL-80

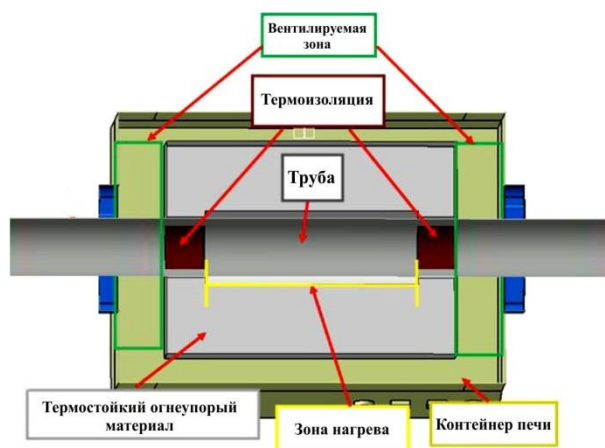


Рисунок 2 – Конструкция печи OTF-1200X-III-S-UL-80

Вакуумная печь OTF-1200X позволяет проводить:

- синтез методом термического химического осаждения из газовой фазы (ТХОГФ) при высоких температурах (максимальная температура нагрева – $1200^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) с контролируемой скоростью нагрева (максимальная скорость нагрева – $20^{\circ}\text{C}/\text{мин}$);
- отжиг образцов в инертной и агрессивной газовых средах.

На рисунке 3 представлен профиль распределения температуры при нагреве всех трёх зон до температуры 800°C .

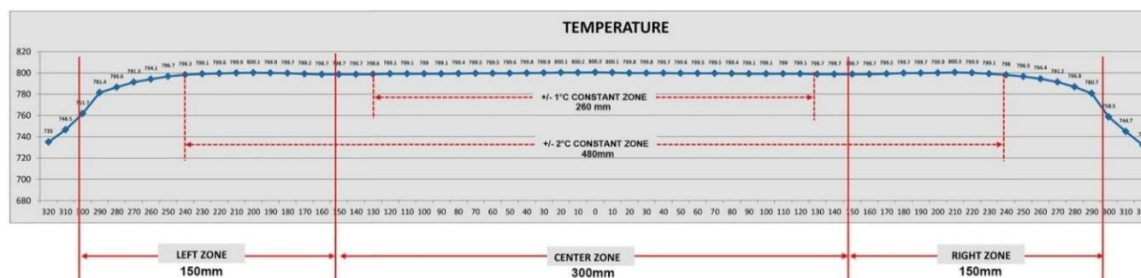


Рисунок 3 – Профиль распределения температуры

Конструкция печи допускает проводить эксперименты одновременно в трёх зонах при разных температурах. Система оснащена тремя температурными регуляторами с 30

программируемыми сегментами, которые обеспечивают точную регулировку скорости нагрева, охлаждения и времени эксперимента.

На рисунке 4 представлена схема собранной экспериментальной установки для проведения синтеза графеновых наноструктур методом химического осаждения из газовой фазы (CVD).

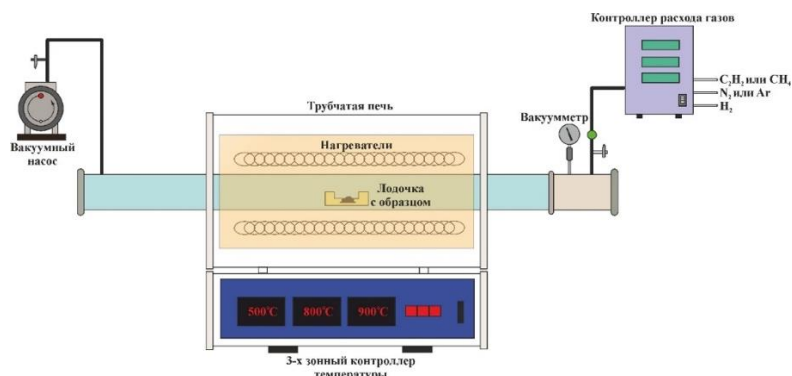


Рисунок 4 – Общая схема установки, используемая в методе ТХОГФ

Данная конструкция позволяет синтезировать различные углеродные наноструктуры. Равномерного распределения потока рабочих газов контролируется стандартными контроллерами расхода газов MCV-500SCCM (производитель “Alicat Scientific”, США). Для создания требуемого уровня вакуума установка оснащена вакуумным насосом Advavac 10. Для контроля уровня вакуума в трубку был смонтирован вакуумметр (Thyracont vsr63dl). Таким образом, была собрана и запуск технологической установки для синтеза графеновых наноструктур, а также наладка сопутствующей вакуумной и газотранспортной системы.

Для оптимизации физических параметров была проведена серия экспериментов в которой в качестве подложек для синтеза графеновых наноструктур использовались медная фольга толщиной 200 мкм, площадью 1 см² и чистотой 99,99 %, а также пластины монокристаллического кремния марки типа КДБ-20 (производитель Siegert Wafer GmbH, Германия) размерами 1×1 см с ориентацией (100). В качестве буферного газа пропускалась аргон-водородная смесь и использовались метан в качестве источника углерода. Предварительно подложки проходили химическую очистку. Обработка проводилась в растворе смеси NH₄OH, H₂O₂ и дистиллированной воды в объемном соотношении 1:1:6., при температуре 50°C, в течение 15 мин, с применением звуковых волн частотой 850 кГц, мощностью 250 Вт. Далее проводились промывка в дистиллированной воде и сушка.

Через кварцевую трубу трехзонной печи с заранее установленной в ней подложки-катализатора меди пропускался смесь газов CH₄/Ar/H₂ в соотношении 2/80/40 куб.м. соответственно, при давлении 110 мбар в течении t=30 мин. Реактор нагревался до необходимой температуры (от 800 до 1000 °C с шагом 200 °C) с контролируемой скоростью (скорость нагрева 20 °C/мин.). По истечению времени синтеза нагрев печи отключался, и система охлаждалась при естественной путем до T = 80 °C в потоке аргона, и потом образец переносился в более охлажденную часть трубы, а затем вынимался наружу.

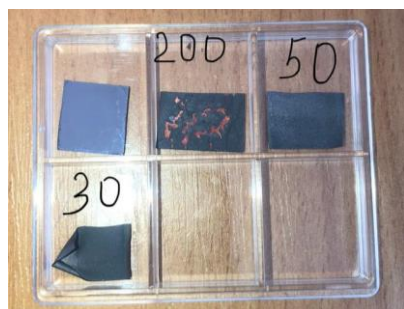
Результаты и их обсуждение.

На рисунке 5 приведена фотография медной фольги после синтеза графена.

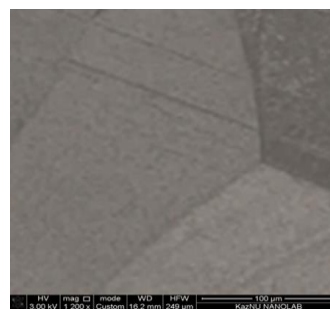
В процессе остывания медной фольги на образуются складки углеродных листов. По этим складкам можно говорить о присутствии тонких слоев графеновых наноструктур.

Полученные образцы были изучены методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Исследование образцов проводилось в Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа с помощью микроскопа Quanta 3D 200i. СЭМ изображения показывают рост графеновых пленок с медной фольги толщиной 200 и

30 мкм. Исходя из СЭМ-изображения при толщине 50 мкм можно сказать, что полученные структуры представляют собой пленку, состоящую из углеродных наноструктур. В ходе исследований был выполнен синтез графеновых слоев методом CVD на металлических подложках. Полученные структуры были исследованы с использованием сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и спектроскопии комбинационного рассеяния (Раман-спектроскопии). Результаты анализов подтвердили получение многослойного графена высокого качества.



а



б

Рисунок 5 – Фотография образцов графена на медной подложке.
а. Образцы графена на медной подложке, б. СЭМ снимок с толщиной графена $d=30\text{мкм}$

Одним из наиболее перспективных направлений применения графена в аэрокосмических технологиях является разработка чувствительных датчиков давления (рис. 6).

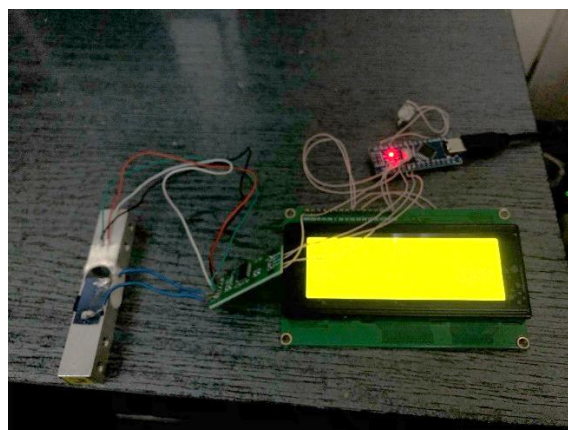
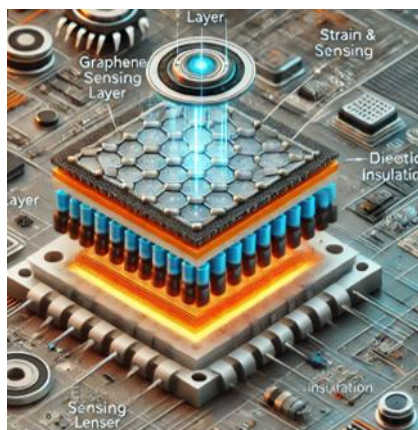


Рисунок 6 – Изображение датчика на основе графена

Графеновые нанорезонаторы обладают высокой чувствительностью за счет уникальных механических свойств материала. Они демонстрируют значительно более высокую чувствительность по сравнению с традиционными кремниевыми датчиками. На сегодняшний день существует ряд методов для измерения давления, которые включают в себя емкостный метод, основанный на изменении емкости между графеновой мембраной и электродом, пьезорезистивный метод, использующий зависимость сопротивления графена от механического напряжения, резонансный метод, позволяющий измерять давление через изменение частоты механического резонанса мембраны. Исследования по измерению давления пьезорезистивный метод показывают хороший результат с небольшой погрешностью и отклонением.

Заключение.

Графеновые материалы открывают новые перспективы для аэрокосмических технологий, позволяя снизить массу аппаратов, улучшить управление тепловыми потоками, повысить эффективность энергетических систем и защиту от радиации. Графеновые композиты демонстрируют высокую прочность и устойчивость к механическим нагрузкам, что делает их перспективными для авиации и космоса.

Экспериментальные данные подтвердили эффективность графеновых покрытий в системах терморегуляции и солнечных панелях, а также их способность экранировать радиацию. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методов массового производства и изучение эксплуатационных характеристик графеновых наноматериалов. Внедрение этих технологий повысит надежность и безопасность аэрокосмических систем.

Благодарности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR21882375 «Создание и модернизация изделий космической техники повышенной надежности наземного и космического сегментов и исследование ионосферы»)

Список литературы

1. Novoselov, K. S., & Geim, A. K. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183–191. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
2. Chen, J., Li, F., & Huang, J. (2019). Graphene-based composite materials for aerospace applications. *Advanced Materials*, 31(25), Article 1902345. <https://doi.org/10.1002/adma.201902345>
3. Zhang, Y., & Li, X. (2020). Impact resistance of graphene-enhanced composites. *Journal of Aerospace Engineering*, 33(5), 04020078. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0001202](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001202)
4. Balandin, A. A. (2011). Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials. *Nature Materials*, 10(8), 569–581. <https://doi.org/10.1038/nmat3064>
5. Bonaccorso, F., Sun, Z., & Hasan, T. (2010). Graphene photonics and optoelectronics. *Nature Photonics*, 4(9), 611–622. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.186>
6. Wang, X., Zhi, L., & Müllen, K. (2008). Transparent, conductive graphene electrodes for flexible solar cells. *Nano Letters*, 8(1), 323–327. <https://doi.org/10.1021/nl072838r>
7. Schwierz, F. (2013). Graphene transistors: Status, prospects, and problems. *Proceedings of the IEEE*, 101(7), 1567–1584. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2257633>
8. Wang, P., & Feng, X. (2021). Graphene-based pressure sensors for aerospace applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 344, 130178. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130178>
9. Kim, J., & Lee, J. (2022). Highly sensitive graphene strain sensors for structural monitoring in space. *Nano Energy*, 93, 106827. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106827>
10. Katsnelson, M. I. (2015). Graphene radiation shielding. *Physical Review B*, 91(4), 045433. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.045433>
11. Stankovich, S., Dikin, D. A., & Dommett, G. H. (2006). Graphene-based composite materials. *Nature*, 442(7100), 282–286. <https://doi.org/10.1038/nature04969>
12. Emtsev, K. V., Bostwick, A., & Horn, K. (2009). Towards wafer-size graphene layers by atmospheric pressure graphitization of silicon carbide. *Nature Materials*, 8(3), 203–207. <https://doi.org/10.1038/nmat2382>
13. Gao, Q., Liu, S., Hou, K., Li, Z., & Wang, J. (2022). Graphene-based nanomaterials as lubricant additives: A review. *Lubricants*, 10(10), 273. <https://doi.org/10.3390/lubricants10100273>

14. Wang, B., Ruan, T., Chen, Y., Jin, F., Peng, L., Zhou, Y., Wang, D., & Dou, S. (2020). Graphene-based composites for electrochemical energy storage. *Energy Storage Materials*, 24, 22–51. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.10.031>
15. Meng, Y., Su, F., & Li, Z. (2019). Boundary and elastohydrodynamic lubrication behaviors of nano-CuO/reduced graphene oxide nanocomposite as an efficient oil-based additive. *Langmuir*, 35(33), 10322–10333. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01130>
16. Ismail, N. A., Chowdhury, Z. Z., Johan, M. R., & Zulkifli, N. W. M. (2021). MoS₂-functionalized graphene composites-potential replacement for lubricant friction modifier and anti-wear additives. *Advanced Engineering Materials*, 23(4), 2100030. <https://doi.org/10.1002/adem.202100030>
17. Sun, J., Ge, C., Wang, C., & Li, S. (2022). Tribological behavior of graphene oxide–Fe₃O₄ nanocomposites for additives in water-based lubricants. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 30(10), 863–872. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2021.1990011>
18. Shi, Q., & Zhu, H. (2020). Effects of Ag/RGO composites as lubricant additives on the tribological properties of lubricating oil. *Powder Metallurgy Technology*, 38(3), 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.pmt.2020.06.002>
19. Meng, Y., Su, F., & Chen, Y. (2015). Synthesis of nano-Cu/graphene oxide composites by supercritical CO₂-assisted deposition as a novel material for reducing friction and wear. *Chemical Engineering Journal*, 281, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.025>
20. Sammaiah, A., Huang, W., & Wang, X. (2018). Synthesis of magnetic Fe₃O₄/graphene oxide nanocomposites and their tribological properties under magnetic field. *Materials Research Express*, 5(10), 105006. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aad2f4>
21. Zhou, Q., Huang, J., Wang, J., Yang, Z., Liu, S., Wang, Z., & Yang, S. (2015). Preparation of a reduced graphene oxide/zirconia nanocomposite and its application as a novel lubricant oil additive. *RSC Advances*, 5(110), 91802–91812. <https://doi.org/10.1039/C5RA10631G>
22. Min, C., He, Z., Liu, D., Jia, W., Qian, J., Jin, Y., & Li, S. (2019). Ceria/reduced graphene oxide nanocomposite: Synthesis, characterization, and its lubrication application. *ChemistrySelect*, 4(17), 4615–4623. <https://doi.org/10.1002/slct.201900779>
23. Chen, L., Tu, N., Wei, Q., Liu, T., Li, C., Wang, W., Li, J., & Lu, H. (2022). Inhibition of cold-welding and adhesive wear occurring on surface of the 6061-aluminum alloy by graphene oxide/polyethylene glycol composite water-based lubricant. *Surface and Interface Analysis*, 54(2), 218–230. <https://doi.org/10.1002/sia.7107>
24. Aissou, T., Braid, N., & Veilleux, J. (2022). A new one-step deposition approach of graphene nanoflakes coating using a radio frequency plasma: Synthesis, characterization and tribological behaviour. *Tribology International*, 167, 107406. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107406>
25. Song, H., Wang, B., Zhou, Q., Xiao, J., & Jia, X. (2017). Preparation and tribological properties of MoS₂/graphene oxide composites. *Applied Surface Science*, 419, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.04.191>
26. Zhang, L., He, Y., Feng, S., Zhang, L., Jiao, Z., Zhan, Y., & Wang, Y. (2016). Preparation and tribological properties of novel boehmite/graphene oxide nano-hybrid. *Ceramics International*, 42(5), 6178–6186. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.01.201>
27. Yi, M., & Shen, Z. (2015). A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(22), 11700–11715. <https://doi.org/10.1039/C5TA00252D>
28. Yazdi, G. R., Iakimov, T., & Yakimova, R. (2016). Epitaxial graphene on SiC: A review of growth and characterization. *Crystals*, 6(5), 53. <https://doi.org/10.3390/cryst6050053>
29. Pei, S., & Cheng, H.-M. (2012). The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 50(9), 3210–3228. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.11.010>

30. Naghdi, S., Rhee, K. Y., & Park, S. J. (2018). A catalytic, catalyst-free, and roll-to-roll production of graphene via chemical vapor deposition: Low-temperature growth. Carbon, 127, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.10.065>
31. Dong, Y., Liu, Q., & Zhou, Q. (2014). Corrosion behavior of Cu during graphene growth by CVD. Corrosion Science, 89, 214–219. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.08.026>
32. Jeon, I., et al. (2011). Passivation of metal surface states: Microscopic origin for uniform monolayer graphene by low-temperature chemical vapor deposition. ACS Nano, 5(3), 1915–1920. <https://doi.org/10.1021/nn103484r>
33. Lin, M.-Y., et al. (2012). Low-temperature grown graphene films by using molecular beam epitaxy. Applied Physics Letters, 101(22), 221911. <https://doi.org/10.1063/1.4765520>
34. Zou, Z., et al. (2014). Carbide-forming groups IVB–VIB metals: A new territory in the periodic table for CVD growth of graphene. Nano Letters, 14(7), 3832–3839. <https://doi.org/10.1021/nl501599v>
35. Juang, Z.-Y., et al. (2009). Synthesis of graphene on silicon carbide substrates at low temperature. Carbon, 47(8), 2026–2031. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.03.022>
36. Juang, Z.-Y., Wu, C.-Y., Lo, C.-W., Chen, W.-Y., Huang, J.-C., Hwang, J.-Y., Chen, C.-H., Gwo, S., & Chen, L.-C. (2009). Synthesis of graphene on silicon carbide substrates at low temperature. Carbon, 47(8), 2026–2031. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.03.022>

АЭРОҒАРЫШТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРДА КӨМІРТЕКТІ НАНОМАТЕРИАЛДАРДЫ ҚОЛДАНУ

***Аңдатпа.** Графен өзінің бірегей физика-химиялық қасиеттеріне байланысты ғылым мен техниканың әртүрлі салаларында кеңінен қолданылады. Бұл мақалада графеннің аэрокосмикалық технологияларда қолданылуы, оның ішінде жеңіл әрі берік материалдар жасау, жылу таратқыш жабындар, күн панельдерінде, ғарыштық аппараттардың электронды құрылғыларында және радиациядан қорғайтын жүйелерде қолдану мүмкіндіктері қарастырылады. Жүргізілген кеңейтілген талдау графенді наноматериалдарды интеграциялау конструкциялардың сипаттамаларын айтарлықтай жақсартуға, сенімділігін арттыруға және экстремалды жағдайларға төзімділігін күшейтуге мүмкіндік беретінін көрсетеді. Бу фазасынан химиялық тұндыру әдісімен (CVD) алынған графеннің сапасы мен синтез тиімділігі тәжірибелік зерттеулермен дәлелденді. Бұл жұмыс аэрокосмикалық жүйелерді әзірлеуде массасы мен беріктігі арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті, сондай-ақ жылу және механикалық жүктемелерге төзімділікті қамтамасыз ететін инновациялық шешімдерге графеннің әлеуетін көрсетеді. Зерттеу нәтижелері графенді қазіргі заманғы аэрокосмикалық жобаларда кеңінен қолдану мен технологияларды жетілдіруге жол ашады. Алынған мәліметтер материалтану саласындағы заманауи әдістердің дамуына ықпал етіп, аэрокосмос саласындағы бәсекелік артықшылықты қамтамасыз етуге көмектеседі. Бұл – болашағы зор бағыт. Сонымен қатар, мақалада графендік наноқұрылымдарды синтездеудің заманауи тәсілдері, бір сатылы және көп сатылы әдістер, металл субстраттарымен өзара әрекеттесу ерекшеліктері мен кристалдық құрылымын бақылау мәселелері сипатталған. CVD үдерістерінің өнеркәсіптік ауқымда қолданылу мүмкіндігіне ерекше назар аударылады. Зерттеуде алынған материалдардың морфологиясы, жылуөткізгіштігі және трибологиялық қасиеттері бойынша тәжірибелік деректер ұсынылған. Нәтижелер жоғары температура мен механикалық жүктеме жағдайында аэрокосмикалық жүйелердің беріктігі мен энергия тиімділігін арттыруға бағытталған функционалдық графен жабындарын әзірлеудің өзектілігін айқындайды.*

***Түйін сөздер:** графен, көміртекті наноматериалдар, аэроғарыштық технологиялар, жылуөткізгіштік, композициялық материалдар, радиациялық қорғаныс.*

APPLICATION OF CARBON NANOMATERIALS IN AEROSPACE TECHNOLOGIES

Abstract. Graphene, owing to its unique physicochemical properties, finds wide application in various fields of science and technology. This article examines the use of graphene in aerospace technologies, including the creation of lightweight and durable materials, heat-dissipating coatings, and its potential application in solar panels, electronic devices of spacecraft, and radiation protection systems. An in-depth analysis shows that the integration of graphene nanomaterials can significantly enhance structural performance, increase reliability, and improve resistance to extreme conditions. Experimental studies using the chemical vapor deposition (CVD) method confirm the efficiency of high-quality graphene synthesis. This work demonstrates the potential of graphene for the development of innovative aerospace systems capable of ensuring an optimal balance between mass and strength, as well as resistance to thermal and mechanical loads. The results of the study may contribute to further technological improvement and broader practical application of graphene in modern aerospace projects. The obtained data open up new opportunities to enhance structural efficiency, promote the advancement of cutting-edge materials science, and provide a competitive advantage in the aerospace industry. This is a promising area. In addition, the article highlights modern approaches to the synthesis of graphene nanostructures, including single-step and multi-step methods, features of interaction with metal substrates, and crystallinity control. Particular attention is given to the scalability of CVD processes for industrial applications. Experimental data are presented on the morphology, thermal conductivity, and tribological characteristics of the obtained materials. The results emphasize the relevance of developing functional graphene coatings to improve the durability and energy efficiency of aerospace systems under high temperatures and mechanical stress.

Keywords: graphene, carbon nanomaterials, aerospace technologies, thermal conductivity, composite materials, radiation protection.

Сведение об авторах

Мурзалинов Данатбек Онгарбекович	PhD, ЧНС ТОО «Физико-технический институт», Алматы, Казахстан, danatbekmurzalinov@gmail.com ;
Грищенко Валентина Федоровна	к.ф.-м.н., зав. лабораторией Надежности и безопасности орбитальных и наземных космических систем ТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан, labreab@mail.ru ;
Гульмайра Партизан	PhD, НАО «Казахский национальный университет имени аль-Фараби», Алматы, Казахстан, gulmira.partizan@mail.ru ;
Кабдуллин Максат	оқытушы, НАО «Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева», Алматы, Казахстан, m.kabdullin@satbayev.university
Ахметсадык Динара Советбековна	магистр прикладного материаловедения, МНС ТОО «Институт ионосферы», Алматы, Казахстан, d.akhmetsadyk@gmail.com

Авторлар туралы мәлімет

Мурзалинов Данатбек Онгарбекұлы	PhD, Аға ғылыми қызметкер, "Физика-техникалық институт" ЖШС, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, danatbekmurzalinov@gmail.com ;
Грищенко Валентина Федоровна	ф.ғ.к., меңгеруші. «Ионосфера институты» ЖШС Орбиталық және жерүсті ғарыш жүйелерінің сенімділігі мен қауіпсіздігі зертханасы, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, labreab@mail.ru ;
Гүлмайра Партизан	PhD, «Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті» КЕАҚ, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, gulmira.partizan@mail.ru ;

Кабдуллин Максат	оқытушы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті КЕАҚ, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, m.kabdullin@satbayev.university
Ахметсадық Динара Советбековна	Қолданбалы материалтану магистрі, КҒК «Ионосфера институты» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан Республикасы, d.akhmetsadyk@gmail.com

Information about the authors

Danatbek Murzalinov	PhD, Senior Researcher, LLP «Institute of Physics and Technology», Almaty, Kazakhstan, danatbekmurzalinov@gmail.com ;
Grishchenko Valentina	Ph.D., head. Laboratory of Reliability and Safety of Orbital and Ground-Based Space Systems LLP «Institute of the Ionosphere», Almaty, Kazakhstan, labreab@mail.ru ;
Gulmaira Partizan	PhD, NJSC «Kazakh National University named after al-Farabi», Almaty, Kazakhstan, gulmira.partizan@mail.ru ;
Maxat Kabdullin	Lecturer, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan, m.kabdullin@satbayev.university
Dinara Akhmetsadyk	Master of Applied Materials Science, Junior researcher, LLP «Institute of the Ionosphere», Almaty, Kazakhstan,, d.akhmetsadyk@gmail.com