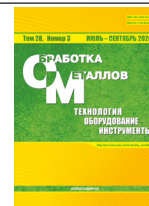




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Структурные исследования графенового покрытия на медной подложке, полученного методом масштабируемого распыления из ксилольной дисперсии

Судхакар Виттхалпрао Гири^{1, 2, а, *}, Арун Аути^{3, b}, Абхиджит Кадам^{4, c}, Раджендра Шинде^{2, d}

¹ Университет им. доктора Бабасахеба Амбедкара в Маратхваде, г. Чхатрапати Самбхаджинагар, штат Махараштра, 431004, Индия

² Кафедра машиностроения, Инженерный колледж им. Чхатрапати Шаху Махараджа Образовательного фонда CSMSS, район Канчанвади, г. Чхатрапати Самбхаджинагар, штат Махараштра, 431011, Индия

³ Кафедра машиностроения, Махараштринский технологический институт, обходная дорога Бид, район Сатара Парисар, ворота № 5, г. Чхатрапати Самбхаджинагар, штат Махараштра, 431010, Индия

⁴ Кафедра физики, Инженерный колледж им. Чхатрапати Шаху Махараджа Образовательного фонда CSMSS, район Канчанвади, г. Чхатрапати Самбхаджинагар, штат Махараштра, 431011, Индия

^a <https://orcid.org/0009-0009-0230-2030>, sudhavgiri@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0003-2132-0532>, arun.autee@mit.asia;

^c <https://orcid.org/0000-0002-0593-6145>, arkadam6@gmail.com; ^d <https://orcid.org/0000-0002-5329-1118>, rajendrashinde2222@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 620.18; 544.7

История статьи:

Поступила: 24 мая 2026

Рецензирование: 30 мая 2026

Принята к печати: 13 июня 2026

Доступно онлайн: 15 сентября 2026

Ключевые слова:

Графеновое покрытие

Теплообменник

Напыленное покрытие

Ксилольная дисперсия

Медная подложка

Рамановская спектроскопия

ИК-Фурье-анализ

РФА-исследования

Малослойный графен

Терморегулирование

АННОТАЦИЯ

Введение. Графен обладает исключительной теплопроводностью, гидрофобностью, механической прочностью и высокой подвижностью носителей заряда, что делает его перспективным материалом для систем терморегулирования и теплообмена. Однако традиционные методы нанесения, такие как химическое осаждение из газовой фазы (CVD), часто являются дорогостоящими, технологически сложными и трудно масштабируемыми для крупногабаритных инженерных приложений. Настоящее исследование направлено на разработку простого, экономически эффективного и масштабируемого метода *in situ* напыления для нанесения графенового покрытия на медные подложки с применением ксилольной дисперсионной системы. **Материалы и методы.** Для получения стабильной распыляемой дисперсии графена использовали графен, синтезированный по модифицированному методу Хаммера и диспергированный в смеси ксилола, изопропанола, эпоксидного связующего и суспендирующих агентов. Покрытие наносили на медные подложки в контролируемых условиях. Структурные и поверхностные характеристики графенового покрытия на медной подложке исследовали с помощью рентгенофазового анализа (РФА), рамановской спектроскопии, инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Толщина слоя графена и межплоскостное расстояние оценивались с использованием закона Брэгга и уравнения Шеррера. **Результаты и обсуждение.** Рентгенофазовый анализ (РФА) подтвердил формирование малослойного графена с межплоскостным расстоянием 3,37 Å и расчетной толщиной, соответствующей приблизительно 5–6 слоям графена. Рамановская спектроскопия выявила характерные D-, G- и 2D-полосы, подтверждающие успешное нанесение графенового покрытия на медную подложку. Отношение I_D/I_G снизилось с 2,1 для исходного графенового порошка до 0,85 после нанесения покрытия, что указывает на преимущественное осаждение лучше диспергированных графеновых листов. ИК-Фурье-анализ показал наличие межфазных взаимодействий Cu–O–C между графеном и медью. Данные РЭМ выявили равномерно распределенные морщинистые графеновые листы, образующие взаимосвязанные проводящие пути по поверхности подложки. Кристаллографическая структура меди осталась неизменной после нанесения покрытия, вторичные фазы не обнаружены. **Заключение.** Разработанный метод напыления с использованием ксилольной дисперсии представляет собой практичный и масштабируемый способ нанесения графенового покрытия на медные подложки. Полученное покрытие продемонстрировало межплоскостное расстояние 3,37 Å, приблизительно 5–6 графеновых слоев, характерные рамановские сигнатуры графена и однородную морфологию поверхности. Результаты настоящей работы подтверждают потенциал графеновых покрытий на медных подложках для применения в системах терморегулирования, включая конденсаторы, испарители, теплообменники с фазовым переходом и высокоэффективные теплообменные поверхности.

Для цитирования: Структурные исследования графенового покрытия на медной подложке, полученного методом масштабируемого распыления из ксилольной дисперсии / С.В. Гири, А. Аути, А. Кадам, Р. Шинде // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2026. – Т. 28, № 3. – С. 185–204. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-185-204.

Введение

Эффективное использование энергии в промышленных системах в значительной степени определяется эффективностью теплообмена между нагретыми и охлажденными теплоносителями. Теплообменники являются ключевыми элементами для реализации этого процесса; повышение их тепловой эффективности позволяет

*Адрес для переписки

Гири Судхакар Виттхалпрао, к.т.н., научный сотрудник
Университет им. доктора Бабасахеба Амбедкара в Маратхваде,
г. Чхатрапати Самбхаджинагар,
431004, штат Махараштра, Индия
Тел.: +91 9850884540, e-mail: sudhavgiri@gmail.com

улучшить общую производительность оборудования и снизить эксплуатационные затраты. Для интенсификации теплообмена исследованы различные подходы – от добавления высокотеплопроводных частиц в рабочие жидкости [1, 2] до нанесения функциональных покрытий на поверхности теплообменников. Среди них графеновые наночастицы [3–7] и содержащие их покрытия вызывают наибольший интерес благодаря уникальному сочетанию свойств графена – высокой теплопроводности и гидрофобности. Эти характеристики позволяют уменьшить габариты теплообменников без потери тепловой мощности и делают графен особенно перспективным для покрытий в аппаратах с фазовым переходом, где он способен существенно повысить интенсивность теплообмена.

Новаторская работа Гейма (Geim) и Новоселова (Novoselov) [4] в 2004 году ознаменовала появление монослойного графена, отличающегося исключительной жесткостью, электро- и теплопроводностью. Высокая теплопроводность графена привлекла значительное внимание в области теплотехники. В этой области исследователи все чаще обращают внимание на монослойный графен вместо традиционных материалов, таких как золото, медь и углеродные нанотрубки, благодаря его исключительной теплопроводности. Это делает графен весьма эффективным для отвода тепла в компактных электронных устройствах. Баладин (Balandin) и соавторы [8] установили, что свободно лежащий графен может превосходить известную теплопроводность любого материала со значением в диапазоне от 2000 до 4000 Вт/(м·К), что также значительно выше, чем у алмаза. Графеновые покрытия на подложках SiO₂ показали теплопроводность около 600 Вт/(м·К), что примерно на 50 % выше, чем у меди. Кроме того, тепловые свойства графеновых материалов исследовались с помощью моделирования [9–11] и экспериментов [12–14]. Перссон (Persson) и соавторы [15] изучали механизм теплообмена при поверхностном контакте между слоями графена и подложками SiO₂, подчеркивая важность частичного поверхностного контакта в теплообмене. Их результаты показали критическую роль реальных контактных поверхностей в повышении эффективности теплообмена.

Концепция фазового перехода нашла применение в технологии теплообмена, вызвав боль-

шой интерес в этой области благодаря широкому промышленному использованию таких процессов. Потенциальным решением для улучшения теплопередачи является добавление наночастиц в рабочую жидкость. Ким (Kim) и соавторы [16] отметили, что частицы в жидкости могут собираться на внутренней поверхности стенки и формировать пористые отложения, которые увеличивают шероховатость поверхности и гидрофильность. Эти изменения усиливают скорость испарения и, следовательно, улучшают общую эффективность теплопередачи. В термосифоне Тонг (Tong) и соавторы [17] исследовали и сравнили эффективность рабочей жидкости с добавлением порошка оксида графена (GO) и рабочей жидкости с наночастицами оксида серебра (Ag₂O). Они обнаружили, что хотя оксид графена является гидрофобным, он обладает отличной проникающей способностью, поскольку располагается слоями с промежутками между ними и позволяет жидкостям проникать туда. Дальнейшие исследования Ан (Ahn) и соавторов [18, 19] показали, что критический тепловой поток увеличился на 70 % после использования восстановленного оксида графена (RGO), это важный параметр кипящего теплообмена. Данное улучшение подчеркивает потенциал материала в повышении эффективности теплопередачи.

Графеновые покрытия, способствующие капельной конденсации (drop-wise condensation, DWC), привлекли внимание благодаря их применению в системах конденсации водяного пара и др. [20, 21]. В традиционных системах конденсация осуществляется в пленочном режиме [21–23], при котором жидкая пленка покрывает более холодную поверхность, и этот режим является предпочтительным для гидрофобных поверхностей металлов, преимущественно используемых в теплообменниках [24]. Однако при снижении смачиваемости поверхности (например, путем нанесения гидрофобного покрытия, такого как графен) могут образовываться дискретные жидкие капли, которые растут до максимального размера, допустимого силами тяжести и другими факторами, а затем скользят по поверхности [25]. Это способствует капельной конденсации вместо пленочной конденсации (film-wise condensation, FWC), что дает существенные преимущества – снижает сопротивление теплопроводности жидкостной

пленки и приводит к значительному увеличению коэффициента теплоотдачи (heat transfer coefficient, НТС). Коэффициент теплоотдачи при капельной конденсации значительно выше – как правило, на порядок по сравнению с пленочной конденсацией, особенно при конденсации пара. Это улучшение коэффициента теплоотдачи при капельной конденсации имеет глубокие последствия для эффективности и производительности многих промышленных процессов конденсации с точки зрения более эффективного теплообмена и использования энергии.

Функционализация поверхности для достижения гидрофобности обычно необходима для получения капельной конденсации [26, 27]. Благодаря своим гидрофобным свойствам графен был признан потенциальным кандидатом для таких покрытий. Экспериментальные измерения и моделирования оценивают краевой угол смачивания графена водой в диапазоне от 95 до 100 градусов [28]. Рафии (Rafiee) и соавторы также обнаружили, что графеновые пленки на различных подложках являются «смачивающе прозрачными» (wetting transparent) и не изменяют смачиваемость нижележащей подложки [29]. Однако с увеличением числа слоев графена это поведение меняется и в конечном счете сходится к краевому углу смачивания объемного графита. Кроме того, возможно улучшение гидрофобных свойств путем наноструктурирования поверхности подложки или использования методов структурирования [30]. Эта модификация поверхности способствует увеличению краевого угла смачивания, что содействует капельной конденсации. Кроме того, было обнаружено, что слои графена, выращенные на медных подложках, снижают гистерезис краевого угла, это приводит к меньшему закреплению водяных капель. Данное свойство важно для обеспечения движения капель и максимальной эффективности капельной конденсации (DWC).

Однородные графеновые покрытия обычно изготавливаются с использованием методов химического осаждения из газовой фазы (chemical vapour deposition, CVD). Альтернативно хлопья могут быть получены путем отслаивания графита с последующим осаждением на подходящие подложки [31, 32]. Эти методы обеспечивают точный контроль над толщиной и однородностью слоя графена, что делает их выгодными

для различных применений. Однако такие процессы могут быть трудоемкими, энергоемкими и дорогостоящими. Оксид графена (GO) имеет ряд преимуществ, включая хорошую совместимость с органическими и водными растворителями и простоту технологической обработки [33]. С помощью различных процессов смачиваемость покрытий GO может быть изменена на гидрофобную [34]. Хотя имеется значительный объем литературы [28, 35] по смачиваемости графеновых пленок, но исследования, специально рассматривающие расчеты теплообмена при капельной конденсации пара, остаются относительно редкими. Тем не менее графен и оксид графена уже были исследованы в приложениях кипения в критических электрических устройствах [36, 37]. Покрытия из графена и GO показали перспективность в повышении эффективности теплообмена в различных контекстах. Например, Рафии и соавторы [29] наблюдали увеличение теплообмена на 30 % на графеновых покрытиях на медных подложках по сравнению с чистой медью при конденсации влажного воздуха. Хак (Haque) и соавторы [38, 39] исследовали рост водяных капель на покрытых GO медных подложках и событие замерзания, подчеркивая потенциал графеновых покрытий в управлении процессами, связанными с водой. Однако конкретное применение графеновых покрытий для усиления теплообмена при конденсации пара остается ограниченным.

Используя подходящие методы нанесения графеновых покрытий на медь и другие металлические трубы и подложки в сочетании с различными наножидкостями, исследователи показали многообещающие улучшения в тепловых характеристиках и механизмах теплообмена. Замечательные свойства и универсальность графена делают его востребованным материалом в различных передовых технологиях и промышленных областях. Однако в значительной части опубликованных исследований авторы использовали растворы GO, из-за чего полученные пленки часто имели неравномерную толщину, что указывает на необходимость дальнейшего изучения методов изготовления или нанесения покрытий. Из-за ограничений метода CVD-нанесения для массового производства выбор других подходящих методов нанесения остается сложной задачей для рассматриваемого при-

менения. Требуется дальнейшее исследование изменений теплофизических свойств, таких как теплопроводность, температуропроводность и удельная теплоемкость, с точки зрения проектирования для расширения применения графенового покрытия в механизмах теплообмена. Эти исследования в совокупности способствуют пониманию динамики испарения и конденсации одиночной капли, давая представление о влиянии свойств поверхности и морфологии на процессы теплообмена с фазовым переходом.

Модифицированный метод Хаммерса является широко признанным и принятым методом химического вторичного отслаивания графена и его производных [40]. Этот метод позволяет получить GO, который после восстановления превращается в RGO. Дальнейшее восстановление и химическая обработка дают графен в одном или нескольких слоях в зависимости от степени восстановления. Однако графен, полученный модифицированным методом Хаммерса, содержит различные дефекты и функциональные группы в разных местах. Хотя он дает дефектный графен, метод можно считать превосходным для изготовления большого количества графена и его производных непосредственно из графита.

Три изомера диметилбензола объединены в группу ксилолов. Этилбензол и изомеры ксилола важны в нефтехимической промышленности как основа для синтеза многих органических соединений [41]. Структура ксилола представляет собой бензольное кольцо с двумя метильными группами (CH₃), что дает три изомера – орто-, мета- и параксилон. Эти изомеры имеют одинаковую химическую формулу C₈H₁₀ или C₆H₄(CH₃)₂, но различаются положениями метильных групп в кольце [42]. Хотя графен обладает присущими ему отличными физическими свойствами, его анизотропная природа создает множество проблем на практике. Нанесение покрытия из графена или его производных на подходящую подложку является одним из методов использования этих превосходных свойств. Хотя большинство применений не предполагают дисперсии графена напрямую, многие из них требуют диспергирования графена на некотором этапе процесса (например, осаждение тонких пленок графена), поэтому стабильность, концентрация и общее качество дисперсии остаются чрезвычайно важными [43].

При приготовлении дисперсий графена для различных применений используются различные методы с разными растворителями. Метод физической дисперсии является предпочтительным по сравнению с химическим окислительным прививанием для защиты и сохранения превосходных свойств графена [44]. В методе физической дисперсии связывание графена с полимером возможно через два слабых связующих взаимодействия: C–H...π и π–π; однако π–π-связывание обеспечивает более прочную адсорбционную связь между графеном и полимером [45–48]. Интеркаляция полимерного растворителя между слоями графена через эти слабые связующие силы может создавать стерическое препятствие через π–π-адсорбцию для диспергирования графена. Однако для связывания графена с полимером через π–π-связывание полимер также должен иметь гексатомную кольцевую структуру [49].

Лю (Liu) и соавторы [49] впервые сообщили о ксилольной дисперсии графена в ароматической нефтяной смоле методом смешивания растворов и исследовали влияние содержания ксилола на качество дисперсии. Полученный раствор дисперсии графена затем использовали для покрытия пластин из алюминиевого сплава 2024 для изучения их защитных свойств от коррозии. Это исследование проводилось с помощью различных методов, таких как РФА, рамановская спектроскопия и РЭМ, для подтверждения присутствия графена в нанесенных покрытиях на подложках из алюминиевого сплава. Их исследование подтвердило успешное диспергирование графена в ароматических нефтяных смолах для защиты от коррозии, но гидрофобная характеристика не рассматривалась. Несмотря на многообещающие результаты, сообщенные о дисперсии графена в ксилольных системах, остается ограниченное понимание масштабируемых методов распыления для получения графеновых покрытий на медных подложках, предназначенных для применения в системах терморегулирования. Большинство опубликованных исследований сосредоточены либо на защите от коррозии, либо на покрытиях на основе оксида графена, в то время как исследования, посвященные прямому осаждению графена, структурным исследованиям и взаимодействиям покрытия с подложкой с помощью простого и промышленно масштаби-

руемого процесса распыления, остаются редкими. Этот пробел в исследованиях послужил мотивацией для настоящей работы.

Графен с эпоксидными связующими для покрытий описан в доступной литературе. Однако при добавлении отвердителя агломерация графена в базовом растворителе со смолой является одним из основных препятствий при приготовлении устойчивого раствора для распыления на металлические подложки для механических применений. Метод напыления, идеальный для получения однородного тонкого покрытия, требует сравнительно более жидкого раствора для распыления, чем другие методы.

Цель настоящего исследования – разработать масштабируемый процесс напыления с использованием ксилольной дисперсии для осаждения графена на медные подложки и исследовать структурные характеристики полученной системы графенового покрытия на меди.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

- приготовить стабильную дисперсию графена с использованием ксилольной растворительной системы;
- нанести графен на медные подложки методом *in situ* напыления;
- исследовать кристаллографические характеристики графена с помощью рентгенофазового анализа (РФА);
- оценить структурные дефекты и характеристики слоев с помощью рамановской спектроскопии;
- исследовать межфазные взаимодействия между графеном и медью с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье);
- исследовать морфологию покрытия с помощью РЭМ;
- оценить пригодность разработанного процесса нанесения покрытия для применения в системах терморегулирования.

Материалы и методы

Материалы

В настоящем исследовании использовался коммерческий графеновый порошок, синтезированный методом усиленного окислительного отслаивания (модифицированный метод Хам-

мерса) и приобретенный у KNV Incorporation, Нагпур, Индия. Модифицированный метод Хаммерса широко признан эффективным и масштабируемым способом получения графеновых материалов, хотя он может вносить структурные дефекты и остаточные кислородсодержащие функциональные группы в процессе окисления и отслаивания. Перед приготовлением покрытия исходный графеновый порошок был всесторонне охарактеризован с использованием рентгенофазового анализа (РФА), рамановской спектроскопии, инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье) и растровой электронной микроскопии (РЭМ). РФА-исследования подтвердили графитоподобную структуру с межплоскостным расстоянием 3,37 Å и расчетной толщиной стопки графеновых слоев, соответствующей приблизительно 5-6 слоям. Рамановская спектроскопия показала характерные D-, G- и 2D-полосы графена с отношением $I_D/I_G = 2,1$, что указывает на наличие структурных дефектов, характерных для химически отслоенного графена. Данные РЭМ выявили характерную морщинистую и слоистую морфологию отслоенных графеновых листов. Результаты характеристики подтвердили пригодность графенового порошка для приготовления стабильных дисперсий и последующего нанесения покрытий методом распыления.

Выбор графена, синтезированного модифицированным методом Хаммерса, был основан на его масштабируемости, коммерческой доступности и пригодности для крупноформатных покрытий. Хотя альтернативные методы синтеза, такие как химическое осаждение из газовой фазы, могут производить графен более высокого качества с меньшим количеством дефектов, эти методы, как правило, связаны с более высокими производственными затратами и меньшей масштабируемостью. Поэтому химически отслоенный графен был признан более подходящим для настоящего исследования, которое сосредоточено на разработке практичного и масштабируемого процесса нанесения покрытия методом распыления.

Методы исследования

Структурные, морфологические и химические характеристики графенового порошка и графеновых покрытий на медных подложках

исследовали с применением комплекса методов: рентгенофазового анализа (РФА), рамановской спектроскопии, инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье) и растровой электронной микроскопии с автоэмиссионным катодом (РЭМ-ПЭ). Методы исследования и рабочие параметры, использованные в настоящем исследовании, обобщены в табл. 1.

Кристаллическая структура, фазовый состав и межплоскостное расстояние образцов графена и графеновых покрытий на меди анализировали с помощью рентгеновского дифрактометра (Bruker D8 Advance, Германия) с Cu-K α -излучением ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) в выбранном диапазоне углов дифракции. Толщина кристаллитов и расчетное количество слоев графена определялись с использованием уравнения Шеррера и закона Брэгга.

Для оценки структурного качества, плотности дефектов и слоевых характеристик графена применяли Раман-спектрометр (Xplora Plus, Horiba Scientific, Франция), оснащенный лазером с длиной волны возбуждения 532 нм и дифракционной решеткой с плотностью штрихов 1200 штр/мм. Мощность лазера тщательно контролировалась для предотвращения локального

термического повреждения нанесенного графена. Для улучшения спектрального разрешения и оценки однородности покрытия на стеклянных подложках методами капельного осаждения и растекания с раскруткой были приготовлены дополнительные графеновые пленки.

Функциональные группы и межфазные химические взаимодействия между графеном и медью исследовали с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье, Shimadzu, Япония) в спектральном диапазоне 400...4000 см⁻¹.

Морфологию поверхности исследовали с использованием растровой электронной микроскопии с автоэмиссионным катодом (РЭМ-ПЭ, JEOL, Япония). Перед проведением РЭМ-исследований образцы покрывали тонким токопроводящим слоем для минимизации зарядки поверхности и улучшения качества изображения. РЭМ-съемку выполняли при соответствующих ускоряющих напряжениях и рабочих расстояниях для наблюдения морфологии графеновых листов, степени покрытия поверхности и однородности покрытия. Энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию (ЭДС) использовали совместно с РЭМ-ПЭ для опре-

Таблица 1

Table 1

Методы исследования, используемое оборудование, рабочие параметры и цели анализа в настоящем исследовании

Characterization techniques, instrumentation, operating parameters, and purpose of analysis used in the present study

Метод / Technique	Оборудование / Equipment	Рабочие параметры / Operating parameters	Цель анализа / Purpose
РФА / <i>XRD</i>	Bruker D8 Advance	Cu-K α , $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ / Cu-K α , $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$	Кристаллическая структура и оценка числа слоев / Crystal structure and layer estimation
Рамановская спектроскопия / <i>Raman</i>	Horiba Xplora Plus	Лазер 532 нм, 1200 штр/мм / 532 nm laser, 1,200 grooves mm ⁻¹	Плотность дефектов и исследование слоев / Defect density and layer characterization
ИК-Фурье / <i>FTIR</i>	Shimadzu FTIR	400...4000 см ⁻¹ / 400–4,000 cm ⁻¹	Анализ функциональных групп / Functional group analysis
РЭМ-ПЭ / <i>FESEM</i>	JEOL FESEM	Соответствующее ускоряющее напряжение / Appropriate accelerating voltage	Анализ морфологии поверхности / Surface morphology analysis
ЭДС* / <i>EDS*</i>	Oxford Inca	Совмещена с РЭМ-ПЭ / Coupled with <i>FESEM</i>	Элементный анализ / Elemental analysis

деления элементного состава покрытых поверхностей и подтверждения наличия богатых углеродом графеновых отложений на медной подложке.

Среднюю толщину покрытия измеряли в нескольких местах с помощью микроскопического анализа изображений и сообщали среднее значение для оценки однородности покрытия и воспроизводимости осаждения.

Результаты и их обсуждение

РФА-исследования

Рентгенофазовый анализ (РФА) был проведен для исследования структурных свойств синтезированного графенового порошка и напыленного покрытия на медной подложке. Как показано на рис. 1, дифрактограмма графенового порошка демонстрирует широкий дифракционный пик с центром приблизительно при $2\theta \approx 26^\circ$, соответствующий плоскости (002) графитового углерода, что хорошо согласуется со стандартной картой ICSD № 00-001-0640. Широкий характер этого пика указывает на присутствие малослойного графена с частичным нарушением упорядоченности в упаковке графеновых листов, что свидетельствует о турбостратной структуре [50, 51].

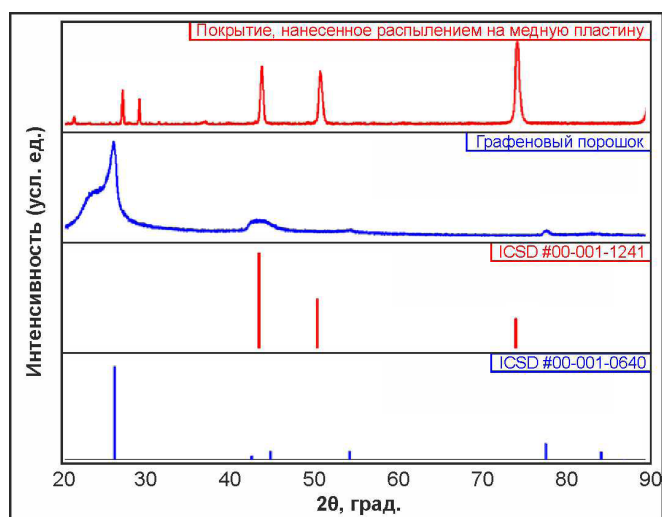


Рис. 1. Дифрактограммы порошка графена и напыленного покрытия на медной подложке, представленные с эталонной дифрактограммой по базе данных ICSD

Fig. 1. XRD patterns of the graphene powder and the spray-coated film on the copper substrate, shown with the standard ICSD reference pattern

Такие широкие рефлексы обычно объясняются снижением кристаллического порядка вдоль оси c и наноразмерной толщиной отслоенных графеновых листов [52]. Отсутствие дополнительных пиков на дифрактограмме подтверждает высокую фазовую чистоту синтезированного графена и указывает на отсутствие значимых кристаллических примесей, таких как оксид графита или аморфный углерод [53].

РФА-исследования также использовали для оценки числа слоев графена с применением закона Брэгга и уравнения Шеррера. Полученные данные РФА были аппроксимированы нелинейной гауссовой функцией, что дало значение полной ширины на половине максимума (ПШПМ) $4,43^\circ$ при положении пика $2\theta = 25,3^\circ$. Рефлекс (002) при $2\theta = 26,4^\circ$ был использован для расчета межплоскостного расстояния $d = 3,37 \text{ \AA}$. Затем было записано уравнение Шеррера для определения толщины кристаллитов (L_c) = 1,84 нм с константой Шеррера $K = 0,9$, которая обычно применяется для графитовых углеродных материалов. По результатам гауссовой аппроксимации ПШПМ составила $4,43 \pm 0,10^\circ$, межплоскостное расстояние – $3,37 \pm 0,02 \text{ \AA}$, а толщина кристаллитов – $1,84 \pm 0,08 \text{ нм}$.

Расчетное число слоев, полученное из РФА-исследований, представляет собой среднюю кристаллографическую толщину графеновых стопок и поэтому должно интерпретироваться как объемный структурный параметр. Число слоев N рассчитывалось по формуле $N = L_c/d$, где d – межплоскостное расстояние, а L_c – толщина стопки кристаллитов.

Хотя рамановская спектроскопия напыленного покрытия показала относительно низкое отношение I_{2D}/I_G ($\sim 0,1$), что указывает на поведение, характерное для многослойного графена, это не противоречит оценке числа слоев по данным РФА. Рамановская спектроскопия исследует локальные поверхностные области, тогда как РФА дает усредненную структурную оценку по большему объему. Поэтому локальная агрегация и неоднородная упаковка графеновых листов в процессе напыления могут приводить к рамановским сигнатурам, характерным для более толстых многослойных областей, при сохранении средней толщины кристаллитов, соответствующей приблизительно 5-6 слоям графена.

Дифрактограмма напыленной графеновой пленки на медной подложке демонстрирует три доминирующих и острых пика при $2\theta = 43,3^\circ$, $50,4^\circ$ и $74,1^\circ$, соответствующих плоскостям (111), (200) и (220) гранецентрированной кубической (ГЦК) меди, что согласуется с картой ICSD № 00-001-1241. Эти острые и интенсивные пики подтверждают высокую кристалличность и металлическую природу медной подложки [54].

Однако крайне малая толщина нанесенного графенового слоя в сочетании со значительно более высокой интенсивностью рассеяния медной подложки ограничивает обнаруживаемость рефлекса графена (002) в обычных РФА-измерениях по схеме $\theta-2\theta$. Скользящая рентгеновская дифрактометрия (grazing-incidence X-ray diffraction, GIXRD) могла бы обеспечить повышенную поверхностную чувствительность и облегчить более прямое наблюдение дифракционного пика графена. Тем не менее в настоящем исследовании для подтверждения успешного нанесения графена на медную подложку использовались дополнительные методы рамановской спектроскопии и ИК-Фурье-анализа, которые позволяют идентифицировать слабый сигнал, возникающий от тонкого слоя графена [55]. Кроме того, поскольку атомный фактор рассеяния углерода меньше, чем у меди, графеновый пик не так заметен, как в дифракционной картине меди. Отсутствие дополнительных дифракционных пиков или смещений означает, что кристаллическая структура медной подложки остается неизменной в процессе напыления. Это свидетельствует о том, что процесс осаждения не повреждает подложку, что согласуется с ранее опубликованными результатами для графеновых или углеродных покрытий на металлических подложках, полученных растворительными или термическими методами.

Таким образом, результаты РФА подтверждают наличие малослойных графитовых структур в синтезированном графеновом порошке и демонстрируют, что процесс напыления обеспечивает успешное осаждение графена на медную подложку без вызываемых детектируемых структурных изменений, вторичных фаз или кристаллографических искажений в нижележащей медной подложке.

Спектроскопический анализ

ИК-Фурье-анализ

ИК-Фурье-спектры образцов Cu, Gr и Gr@Cu представлены на рис. 2 и содержат информацию о функциональных группах, межфазных взаимодействиях и химических связях, ассоциированных с нанесенным графеновым покрытием.

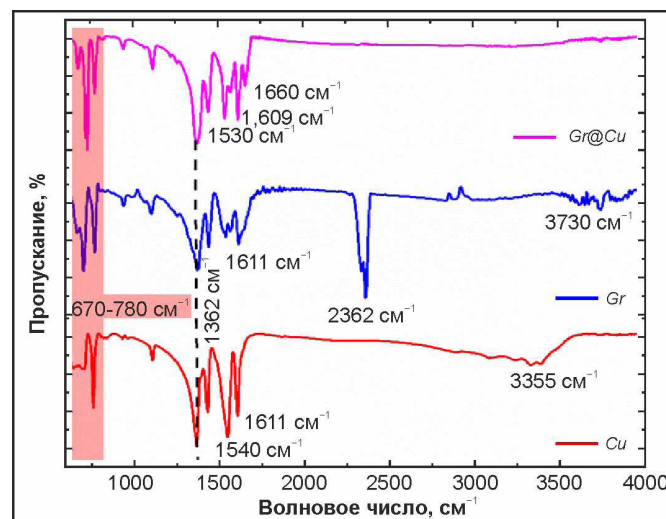


Рис. 2. ИК-Фурье-спектры образцов Cu, Gr и Gr@Cu

Fig. 2. FTIR spectra of the Cu, Gr, and Gr@Cu samples

Для чистой медной подложки наблюдались две полосы поглощения при приблизительно 1540 и 3355 см^{-1} . Широкая полоса с центром при 3355 см^{-1} относится к валентным колебаниям О–Н поверхностных гидроксильных групп и адсорбированной влаги вследствие атмосферного воздействия. Пик при 1540 см^{-1} связан с поверхностными кислородсодержащими частицами и адсорбированными молекулярными группами, а не с прямыми валентными колебаниями Cu–O, которые обычно регистрируются ниже 700 см^{-1} , или с деформационными колебаниями адсорбированной воды.

Наличие тонкого слоя природного оксида на поверхности меди, образующегося при атмосферном воздействии, отражается в широкой полосе при 3355 см^{-1} , отнесенной к валентным колебаниям О–Н поверхностных гидроксильных групп.

Для образца графена (Gr) характерные пики наблюдаются при 1362 см^{-1} (валентные колебания С–О, эпоксидные или гидроксильные группы) и 1611 см^{-1} (валентные колебания С=C sp^2 -гибридизованных атомов углерода).

Слабый пик вблизи 2362 см^{-1} также обнаружен; однако эта полоса, скорее всего, является инструментальным артефактом от атмосферного CO_2 в оптическом тракте ИК-Фурье. Широкая полоса вблизи 3730 см^{-1} относится к остаточным гидроксильным группам. В целом перечисленные спектральные признаки указывают на присутствие малослойного графена с ограниченным содержанием кислородсодержащих функциональных групп, что характерно для химически отслоенного графена, полученного по модифицированному методу Хаммерса.

Композит Gr@Cu показывает новые пики при 1530 , 1609 и 1660 см^{-1} , отнесенные к валентным колебаниям C-C и C=O графитовых и карбоксильных доменов соответственно. Дополнительные низкочастотные полосы в диапазоне $670\ldots 780\text{ см}^{-1}$ отнесены к связям Cu-O-C и (или) Cu-O , что указывает на межфазное химическое связывание между графеном и медной подложкой. Широкая ОН-полоса, наблюдаемая на чистой меди, ослаблена или отсутствует, что свидетельствует о полном покрытии поверхности и ее защите от дальнейшего окисления. Полоса при 1610 см^{-1} для Cu и Gr@Cu перекрывается, это указывает на сильную химическую связь между двумя фазами.

Появление полос валентных колебаний Cu-O-C в диапазоне $670\ldots 780\text{ см}^{-1}$ и уменьшение содержания кислородсодержащих групп по сравнению с Gr указывают на успешное межфазное взаимодействие в процессе нанесения покрытия и частичное восстановление графена. Спектральные изменения, наблюдаемые для Gr@Cu , подтверждают успешное осаждение графена и формирование прочных межфазных взаимодействий. Полосы в области $670\ldots 780\text{ см}^{-1}$ указывают на образование межфазных связей Cu-O-C , а уменьшение содержания кислородсодержащих функциональных групп по сравнению с графеновым порошком свидетельствует о частичном восстановлении и стабилизации нанесенного графенового слоя. Эти наблюдения указывают на химически стабильное и непрерывное графеновое покрытие на медной поверхности.

Такие межфазные взаимодействия, как ожидается, улучшат стабильность покрытия и облегчат перенос энергии через границу раздела «графен – медь», что благоприятно для применения

в системах терморегулирования. Однако прямые измерения теплопроводности выходили за рамки настоящего исследования и будут рассмотрены в будущих работах.

Эффективный перенос фононов через границу раздела Gr-Cu достигается за счет снижения межфазного термического сопротивления, чему способствуют связи Cu-O-C и улучшенное графитовое связывание. Это улучшенное фонон-электронное взаимодействие усиливает теплопроводность, а также обеспечивает защиту от окисления и коррозии. В целом ИК-Фурье подтверждает успешное формирование химически связанной гибридной структуры Gr@Cu со структурными и термическими преимуществами для эффективных и долговечных теплообменных применений. Данные по связыванию и валентным колебаниям для образцов Cu , Gr и Gr@Cu обобщены в табл. 2–4.

Рамановский спектроскопический анализ

Рамановская спектроскопия является неразрушающим, универсальным и широко используемым методом исследования углеродных материалов [56]. Она обычно применяется совместно с другими методами для идентификации аллотропных форм углерода и позволяет проводить как количественный, так и качественный анализ графитовых углеродных материалов. Характерные положения D-, G- и 2D-полос служат отличительными признаками графита, оксида графена (GO), восстановленного оксида графена (RGO) и графена. Графен характеризуется наличием трех характерных полос: D-полоса в области 1350 см^{-1} обусловлена дефектами; G-полоса в интервале $1550\ldots 1600\text{ см}^{-1}$ соответствует плоскостным валентным колебаниям sp^2 -гибридизованных атомов углерода в гексагональной решетке; 2D-полоса, являющаяся обертоном D-полосы при $2650\ldots 2750\text{ см}^{-1}$, считается характерным признаком графена.

В зависимости от степени восстановления и способа синтеза D-полоса может присутствовать или отсутствовать, однако 2D-полоса вместе с G-полосой обязательны для подтверждения наличия графена на подложке [56]. Бездефектный однослойный графен (single-layer graphene, SLG) демонстрирует острый интенсивный 2D-пик в районе 2700 см^{-1} по отношению к другим полосам (рис. 3). Интенсивность 2D-полосы уменьшается с увеличением числа слоев. Несмотря на

Таблица 2

Table 2

Отнесение полос ИК-Фурье-спектра для образца меди (Cu)
FTIR band assignment for Cu sample

Волновое число, cm^{-1} / Wavenumber (cm^{-1})	Колебание / Функциональная группа / Vibration / Functional group	Связь / Мода / Assigned bond / Mode	Интерпретация / Interpretation
1540 / 1,540	Поверхностные кислородсодержащие частицы / Surface-associated oxygen species	Адсорбированные кислородсодержащие группы / Adsorbed oxygen-containing groups	Указывает на продукты поверхностного окисления и адсорбированные молекулярные частицы / Indicates surface oxidation products and adsorbed molecular species
1611 / 1,611	Деформационное колебание Н–О–Н / <i>H–O–H</i> bending vibration	Адсорбированная влага / Adsorbed moisture	Поверхностная влага от атмосферного воздействия / Surface moisture from atmospheric exposure
3355 / 3,355	Валентное колебание О–Н / <i>O–H</i> stretching	Гидроксильные группы / Hydroxyl groups	Присутствие поверхностных гидроксильных групп и адсорбированных молекул воды / Presence of surface hydroxyl species and adsorbed water molecules

Таблица 3

Table 3

Отнесение полос ИК-Фурье-спектра для образца графена (Gr)
FTIR band assignment for graphene (Gr) sample

Волновое число, cm^{-1} / Wavenumber (cm^{-1})	Колебание / Функциональная группа / Vibration / Functional group	Связь / Мода / Assigned bond / Mode	Интерпретация / Interpretation
1362 / 1,362	Валентное колебание С–О / <i>C–O</i> stretching	Остаточные кислородсодержащие группы / Residual oxygen-containing groups	Указывает на неполное удаление кислородных функциональных групп / Indicates incomplete removal of oxygen functionalities
1611 / 1,611	Валентное колебание С=C / <i>C=C</i> stretching	Колебание графитового скелета / Graphitic backbone vibration	Подтверждает графитовую углеродную сеть / Confirms the graphitic carbon network
2362 / 2,362	Атмосферный CO_2 / Atmospheric CO_2	Инструментальный артефакт / Instrumental artefact	Связан с CO_2 в оптическом тракте ИК-Фурье / Associated with CO_2 in FTIR optical path
3730 / 3,730	Валентное колебание О–Н / <i>O–H</i> stretching	Остаточные гидроксильные группы / Residual hydroxyl groups	Свидетельство наличия остаточных кислородсодержащих частиц / Evidence of remaining oxygen-containing species

Отнесение полос ИК-Фурье-спектра для графенового покрытия на меди (Gr@Cu)

FTIR band assignment for graphene-coated copper (Gr@Cu)

Волновое число, см ⁻¹ / Wavenumber (cm ⁻¹)	Колебание / Функциональная группа / Vibration / Functional group	Связь / Мода / Assigned bond / Mode	Интерпретация / Interpretation
1530 / 1,530	Валентное колебание C=C / C=C stretching	Колебание графитового домена / Graphitic domain vibration	Подтверждает наличие графенового слоя на поверхности Cu / Confirms graphene layer on the Cu surface
1609 / 1,609	Валентное колебание C=C / перекрытие с Cu–O / C=C stretching / Cu–O overlap	π-связь (растяжение) / π-bond stretching	Указывает на сильное межфазное взаимодействие между Cu и графе- ном / Indicates strong interfacial cou- pling between Cu and graphene
1660 / 1,660	Валентное колебание C=O / C=O stretching	Карбонильные / карбоксильные группы / Carbonyl / carboxylic groups	Предполагает частичное окисление или межфазную функционализа- цию / Suggests partial oxidation or in- terfacial functionalization
670...780 / 670–780	Валентное колебание Cu–O–C / Cu–O / Cu–O–C / Cu–O stretching	Межфазная связывающая мода / Interfacial bonding mode	Свидетельство образования связи Cu–O–C между металлом и графено- выми слоями / Evidence of Cu–O–C linkage between the metal and graphene layers

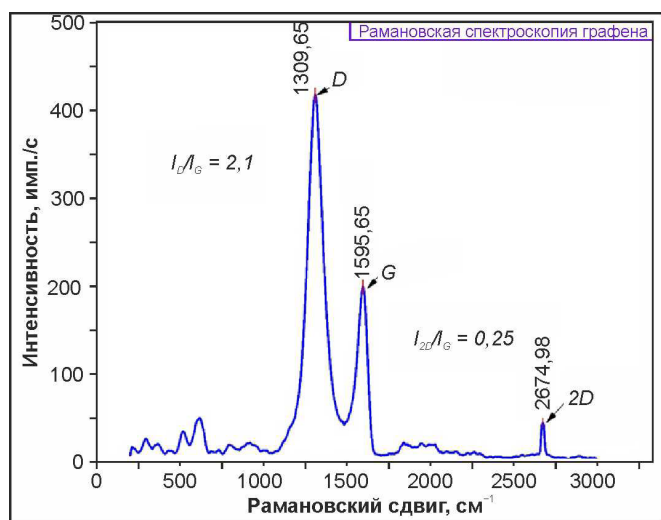


Рис. 3. Рамановский спектр порошка графена, полученный при формировании тонкой пленки на стеклянных подложках

Fig. 3. Raman spectroscopy of graphene powder obtained by making a thin film on glass substrates

меньшую интенсивность, наличие 2D-полосы указывает на присутствие графена даже в многослойных образцах.

Графеновый порошок, использованный в настоящем исследовании, был получен по модифицированному методу Хаммера с последующим восстановлением. При рамановском спектроскопическом анализе все три вышеупомянутые полосы проявляются при своих характерных положениях. Как показано на рис. 3, D-, G- и 2D-полосы наблюдаются при 1310 см⁻¹, 1596 см⁻¹ и 2675 см⁻¹ соответственно. Отношение I_D/I_G составляет 2,1, тогда как отношение I_{2D}/I_G равно 0,25, это указывает на то, что образец состоит из малослойного графена, что согласуется с результатами РФА. Количество слоев, рассчитанное по пику (002) при $2\theta \approx 26^\circ$, было оценено как 5-6, что хорошо согласуется с данными из литературы.

Тот же графеновый порошок был использован для приготовления ксилольного графенового раствора для распыления. Как показано на рис. 4, рамановский спектр напыленного покрытия на медной подложке указывает на то, что графен был хорошо диспергирован в растворе для распыления и равномерно осажден на под-

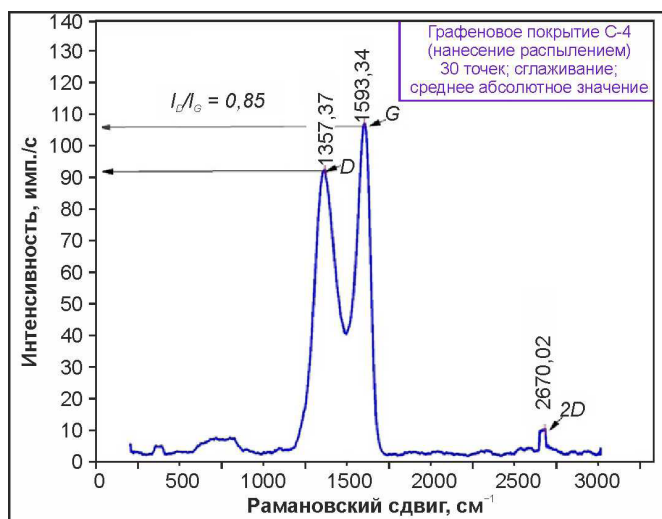


Рис. 4. Рамановский спектр напыленного графенового покрытия, нанесенного из ксилольной дисперсии на медную подложку

Fig. 4. Raman spectrum of the xylene-based graphene spray coating on the copper substrate

ложке. Все характерные полосы графена проявляются при своих ожидаемых волновых числах. На рис. 4 D-, G- и 2D-полосы наблюдаются при 1357 см^{-1} , 1593 см^{-1} и 2670 см^{-1} соответственно. Отношение I_D/I_G составляет 0,85, тогда как отношение I_{2D}/I_G равно 0,1, что указывает на снижение плотности дефектов.

Уменьшение отношения I_D/I_G с 2,1 до 0,85 не следует интерпретировать как структурное восстановление графена под действием ксилола. Скорее, снижение, вероятно, связано с преимущественным диспергированием и осаждением менее дефектных графеновых листов в процессе напыления, в то время как сильно дефектные агрегаты остаются в осадке при приготовлении дисперсии. Это подтверждается сравнительно менее интенсивным D-пиком относительно G-пика. Данные наблюдения указывают на то, что ксилол может быть использован в качестве эффективного диспергирующего агента для приготовления стабильной, пригодной для распыления графеновой суспензии. Это открытие может способствовать крупномасштабным процессам нанесения графеновых покрытий на материалы теплообменников для эффективного управления энергией.

Хотя РФА-исследования указывают на приблизительно 5-6 слоев графена, низкое отношение I_{2D}/I_G ($\sim 0,1$), наблюдаемое в рамановской спектроскопии, предполагает поведение,

характерное для многослойного графена. Это кажущееся расхождение может возникать из-за локальной агломерации и неоднородной упаковки графеновых листов в процессе напыления. В то время как РФА дает усредненную объемную структурную оценку, рамановская спектроскопия исследует локальные поверхностные области. Поэтому более толстые графеновые агрегаты в определенных местах могут вносить вклад в наблюдаемый рамановский отклик.

Исследование морфологии

РЭМ-анализ

РЭМ-микрофотографии на рис. 5 дают детальное представление о морфологии поверхности и микроструктурных особенностях исследованных образцов. Изображения рис. 5, а и б показывают гибридный Gr@Cu, в котором графеновые листы равномерно распределены и выглядят компактными с некоторой агломерацией на медной подложке. Графеновые слои демонстрируют типичное сморщивание и складывание, образуя взаимосвязанные сети, способные перекрывать промежутки между медными зернами.

Обе особенности усиливают теплоперенос и электронную проводимость в системах теплообменников, поскольку конформное покрытие создает непрерывные проводящие пути. Наблюдаемая агрегированная морфология свидетельствует о прочной межфазной связи между медью и графеном, что приводит к улучшению механической целостности и снижению межфазного термического сопротивления.

Напротив, изображения рис. 5, в и г показывают поверхность чистой меди с более гладкой зеренной морфологией, металлическим блеском и четко выраженными границами зерен. Поверхность меди компактна, но не имеет взаимосвязанной наносетчатой структуры, наблюдаемой в гибридном образце. Без графенового покрытия фоновое взаимодействие снижается, а межфазное рассеяние увеличивается, что приводит к более низкой эффективности теплопереноса по сравнению с Gr@Cu.

Морфология графенового порошка, полученного по модифицированному методу Хаммерса, показана на изображениях рис. 5, д и е и демонстрирует тонкие, морщинистые и слоистые листы, характерные для отслоенного графена, часто в виде стопок или частично скомканных

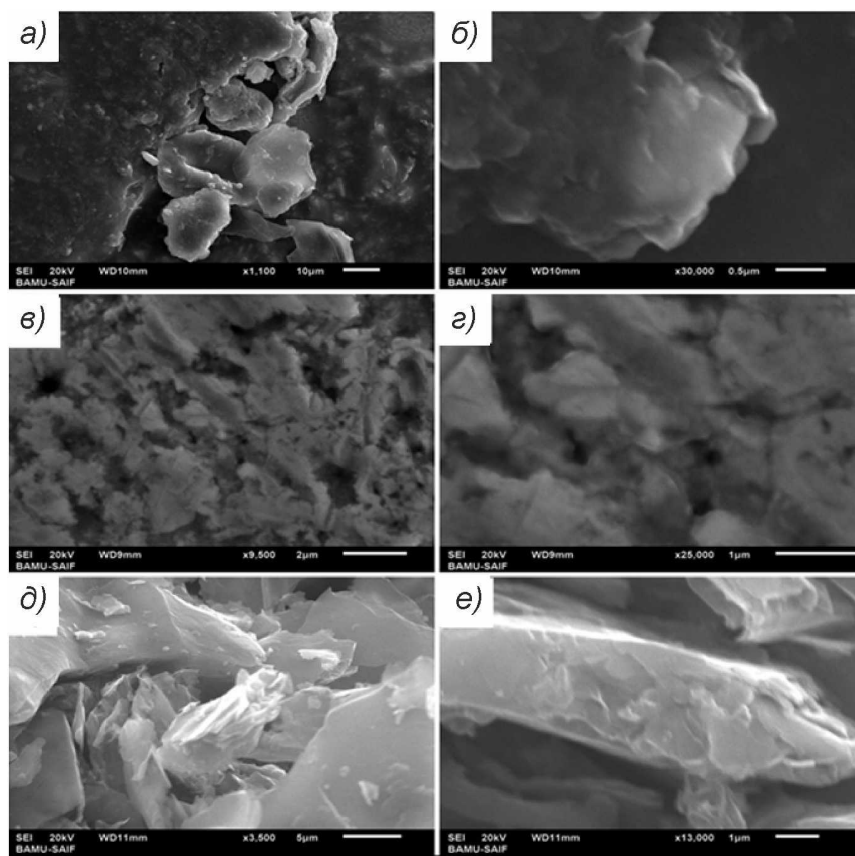


Рис. 5. РЭМ-изображения:

a, б – Gr@Cu (графеновое покрытие на меди); *в, г* – медная подложка (Cu);
д, е – порошок графена (Gr)

Fig. 5. SEM images of:

a, б – Gr@Cu; *в, г* – Cu and *д, е* – Gr

форм. Такая морфология обеспечивает большую площадь поверхности и высокую собственную теплопроводность, что дополнительно подтверждает пригодность графена в качестве покрытия для металлических подложек.

Таким образом, непрерывный, но агломерированный характер Gr@Cu указывает на его потенциал для применения в системах теплообмена и терморегулирования, открывая перспективное направление для дальнейших разработок.

РЭМ-съемка выполнялась при ускоряющем напряжении 15 кВ и рабочем расстоянии приблизительно 10 мм. Масштабные метки расположены на всех микрофотографиях.

Заключение

1. Разработан масштабируемый процесс нанесения графенового покрытия методом распыления с использованием ксилольной дисперсии на медные подложки.

2. РФА-исследования подтвердили формирование малослойного графена с межплоскостным расстоянием $3,37 \pm 0,02 \text{ \AA}$ и количеством слоев приблизительно 5-6.

3. Рамановская спектроскопия выявила характерные D-, G- и 2D-полосы со снижением отношения I_D/I_G с 2,1 до 0,85 после нанесения покрытия.

4. ИК-Фурье-анализ подтвердил межфазные взаимодействия между графеном и медью через связи Cu–O–C.

5. РЭМ-анализ показал наличие взаимосвязанных морщинистых графеновых сетей, распределенных по поверхности медной подложки.

6. Разработанная система покрытия демонстрирует потенциал для применения в системах терморегулирования, включая испарители, конденсаторы и теплообменники с фазовым переходом.

7. В будущих исследованиях планируется сосредоточиться на оптимизации толщины покрытия, испытаниях на адгезию, измерении краевого угла смачивания и оценке теплопроводности.

Список литературы

1. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers / S.A. Marzouk, M.M. Abou Al-Sood, E.M.S. El-Said, M.M. Younes, M.K. El-Fakharany // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2023. – Vol. 148. – P. 7539–7578.
2. *Pungaiya S., Kailasanathan C.* A review of surface coating technology to increase the heat transfer // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. – 2018. – Vol. 7 (5). – P. 458–465.
3. Recent advance on graphene in heat transfer enhancement of composites / C. Liu, M. Chen, W. Yu, Y. He // *ES Energy & Environment*. – 2018. – Vol. 2. – P. 31–42. – URL: <http://www.espublisher.com/journals/articledetails/72/> (accessed: 11.08.2026).
4. Electric field effect in atomically thin carbon films / K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov // *Science*. – 2004. – Vol. 306 (5696). – P. 666–669.
5. Superior thermal conductivity of single-layer grapheme / A.A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan, F. Miao, C.N. Lau // *Nano Letters*. – 2008. – Vol. 8 (3). – P. 902–907.
6. Structural evolution and thermal conductivity of flexible graphite films prepared by carboxylic graphene/polyimide / L. Ma, Y. Wang, X. Xu, Y. Wang, C. Wang // *Ceramics International*. – 2021. – Vol. 47 (1). – P. 1076–1085.
7. Polyacrylonitrile coupled graphite oxide film with improved heat dissipation ability / K. Wang, M. Li, J. Zhang, H. Lu // *Carbon*. – 2019. – Vol. 144. – P. 249–258.
8. Dimensional crossover of thermal transport in few-layer grapheme / S. Ghosh, W. Bao, D.L. Nika, S. Subrina, E.P. Pokatilov, C.N. Lau, A.A. Balandin // *Nature Materials*. – 2010. – Vol. 9 (7). – P. 555–558.
9. The unexpected thermal conductivity from graphene disk, carbon nanocone to carbon nanotube / D. Ma, H. Ding, X. Wang, N. Yang, X. Zhang // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 108. – P. 940–944.
10. *Ghasemi H., Rajabpour A., Akbarzadeh A.H.* Tuning thermal conductivity of porous graphene by pore topology engineering: Comparison of non-equilibrium molecular dynamics and finite element study // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – Vol. 123. – P. 261–271.
11. *Subrina S., Kotchetkov D., Balandin A.A.* Heat removal in silicon-on-insulator integrated circuits with graphene lateral heat spreaders // *IEEE Electron Device Letters*. – 2009. – Vol. 30 (12). – P. 1281–1283.
12. Graphene quilts for thermal management of high-power GaN transistors / Z. Yan, G. Liu, J.M. Khan, A.A. Balandin // *Nature Communications*. – 2012. – Vol. 3. – P. 827.
13. Thermal conductivity of graphene laminate / H. Malekpour, K.-H. Chang, J.-C. Chen, C.-Y. Lu, D.L. Nika, K.S. Novoselov, A.A. Balandin // *Nano Letters*. – 2014. – Vol. 14 (9). – P. 5155–5161.
14. *Shahil K.M.F., Balandin A.A.* Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials // *Solid State Communications*. – 2012. – Vol. 152 (15). – P. 1331–1340.
15. *Persson B.N.J., Ueba H.* Heat transfer between graphene and amorphous SiO₂ // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2010. – Vol. 22 (46). – DOI: 10.1088/0953-8984/22/46/462201.
16. Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids / S.J. Kim, I.C. Bang, J. Buongiorno, L.W. Hu // *Applied Physics Letters*. – 2006. – Vol. 89 (15).
17. Enhanced evaporation strength through fast water permeation in graphene-oxide deposition / W. Li Tong, W.-J. Ong, S.-P. Chai, M.K. Tan, Y. Mun Hung // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5 (1).
18. A novel role of three-dimensional graphene foam to prevent heater failure during boiling / H.S. Ahn, J.M. Kim, C. Park, J.-W. Jang, J.S. Lee, H. Kim, M. Kaviani, M.H. Kim // *Scientific Reports*. – 2013. – Vol. 3. – P. 1960.
19. Boiling characteristics on the reduced graphene oxide films / H.S. Ahn, J.M. Kim, J.M. Kim, S.C. Park, K. Hwang, H.J. Jo, T. Kim, D.W. Jerng, M. Kaviani, M.H. Kim // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2015. – Vol. 60. – P. 361–366.
20. *Chang H., Wu H.* Graphene-based nanomaterials: Synthesis, properties, and optical and optoelectronic applications // *Advanced Functional Materials*. – 2013. – Vol. 23 (16). – P. 1984–1997.
21. Graphene-based smart materials / X. Yu, H. Cheng, M. Zhang, Y. Zhao, L. Qu, G. Shi // *Nature Reviews Materials*. – 2017. – Vol. 2 (9). – P. 17046.
22. *Sun Z., Chang H.* Graphene and graphene-like two-dimensional materials in photodetection: Mechanisms and methodology // *ACS Nano*. – 2014. – Vol. 8 (5). – P. 4133–4156.
23. *Renteria J.D., Nika D.L., Balandin A.A.* Graphene thermal properties: Applications in thermal management and energy storage // *Applied Sciences*. – 2014. – Vol. 4. – P. 525–547.
24. *Schrader M.E.* Wettability of clean metal surfaces // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 1984. – Vol. 100 (2). – P. 372–380.
25. Dropwise condensation studies on multiple scales / B.S. Sikarwar, S. Khandekar, S. Agrawal, S. Kumar, K. Muralidhar // *Heat Transfer Engineering*. – 2012. – Vol. 33 (4–5). – P. 301–341.



26. Stable dropwise condensation for enhancing heat transfer via the initiated chemical vapor deposition (iCVD) of grafted polymer films / A.T. Paxson, J.L. Yagüe, K.K. Gleason, K.K. Varanasi // *Advanced Materials*. – 2014. – Vol. 26. – P. 418–423.
27. Dropwise condensation over superhydrophobic aluminium surfaces / R. Parin, D. Del Col, S. Bortolin, A. Martucci // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 745. – P. 032134.
28. *Raj R., Maroo S.C., Wang E.N.* Wettability of grapheme // *Nano Letters*. – 2013. – Vol. 13. – P. 1509–1515.
29. Wetting transparency of grapheme / J. Rafiee, X. Mi, H. Gullapalli, A.V. Thomas, F. Yavari, Y. Shi, P.M. Ajayan, N.A. Koratkar // *Nature Materials*. – 2012. – Vol. 11. – P. 217–222.
30. Graphene drape minimizes the pinning and hysteresis of water drops on nanotextured rough surfaces / E. Singh, A.V. Thomas, R. Mukherjee, X. Mi, F. Houshmand, Y. Peles, Y. Shi, N. Koratkar // *ACS Nano*. – 2013. – Vol. 7 (4). – P. 3512–3521.
31. Synthesis and characterization of graphene thin films by chemical reduction of exfoliated and intercalated graphite oxide / F.T. Thema, M.J. Moloto, E.D. Dikio, N.N. Nyangiwe, L. Kotsedi, M. Maaza, M. Khenfouch // *Journal of Chemistry*. – 2013. – Vol. 1. – P. 150536.
32. *Edwards R.S., Coleman K.S.* Graphene synthesis: Relationship to applications // *Nanoscale*. – 2013. – Vol. 5. – P. 38–51.
33. Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications / Y. Zhu, S. Murali, W. Cai, X. Li, J.W. Suk, J.R. Potts, R.S. Ruoff // *Advanced Materials*. – 2010. – Vol. 22. – P. 3906–3924.
34. *Perrozzi F., Prezioso S., Ottaviano L.* Graphene oxide: From fundamentals to applications // *Journal of Physics: Condensed Matter*. – 2015. – Vol. 27.
35. Highly hydrophobic and adhesive performance of graphene films / X. Zhang, S. Wan, J. Pu, L. Wang, X. Liu // *Journal of Materials Chemistry*. – 2011. – Vol. 21. – P. 12251–12258.
36. *Jaikumar A., Kandlikar S.G., Gupta A.* Pool boiling enhancement through graphene and graphene oxide coatings // *Heat Transfer Engineering*. – 2017. – Vol. 38. – P. 1274–1284.
37. A multiscale morphological insight into graphene-based coatings for pool boiling applications / A. Gupta, A. Jaikumar, S.G. Kandlikar, A. Rishi, A. Layman // *Heat Transfer Engineering*. – 2018. – Vol. 39. – P. 1331–1342.
38. *Haque M.R., Betz A.R.* Frost formation on aluminum and hydrophobic surfaces // *Proceedings of the ASME 16th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*. – 2018. – DOI: 10.1115/ICNMM2018-7609.
39. *Haque M.R., Das S.R., Betz A.R.* Experimental investigation of condensation and freezing phenomena on hydrophilic and hydrophobic graphene coating // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 160. – P. 113987.
40. Comparison on graphite, graphene oxide and reduced graphene oxide: Synthesis and characterization / N.M.S. Hidayah, W.-W. Liu, C.-W. Lai, N.Z. Noriman, C.-S. Khe, U. Hashim, H.C. Lee // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1892. – DOI: 10.1063/1.5005764.
41. *Rodrigues W.L., Mattedi S., Abreu J.C.N.* Vapor-liquid equilibria data for binary systems of ethylbenzene + xylene isomers at 100.65 kPa // *Journal of Chemical and Engineering Data*. – 2005. – Vol. 50 (4). – P. 1134–1138.
42. *Zhou Y., Wu J., Lemmon E.W.* Thermodynamic properties of o-xylene, m-xylene, p-xylene, and ethylbenzene // *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. – 2012. – Vol. 41 (2).
43. *Johnson D.W., Dobson B.P., Coleman K.S.* A manufacturing perspective on graphene dispersions // *Current Opinion in Colloid and Interface Science*. – 2015. – Vol. 20. – P. 367–382.
44. Dispersions of non-covalently functionalized graphene with minimal stabilizer / D. Parviz, S. Das, H.S.T. Ahmed, F. Irin, S. Bhattacharia, M.J. Green // *ACS Nano*. – 2012. – Vol. 6 (10). – P. 8857–8867. – DOI: 10.1021/nn302784m.
45. *Umadevi D., Panigrahi S., Sastry G.N.* Noncovalent interaction of carbon nanostructures // *Accounts of Chemical Research*. – 2014. – Vol. 47 (8). – P. 2574–2581.
46. The role of non-covalent interactions and matrix viscosity on the dispersion and properties of LLDPE/MWCNT nanocomposites / A.A. Vasileiou, A. Docoslis, M. Kontopoulou, P. Xiang, Z. Ye // *Polymer*. – 2013. – Vol. 54 (19). – P. 5230–5240.
47. *Nishio M.* The CH/ π hydrogen bond in chemistry // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2011. – Vol. 13 (31). – P. 13873–13900.
48. Hybrid density functional theory for π -stacking interactions: Application to benzenes, pyridines, and DNA bases / M.P. Waller, A. Robertazzi, J.A. Platts, D.E. Hibbs, P.A. Williams // *Journal of Computational Chemistry*. – 2006. – Vol. 27 (4). – P. 491–504.
49. The influence of xylene content on the dispersion of graphene in aromatic petroleum resin by solution mixing / Z. Liu, H. Gao, S. Wen, H. Lin, X. Chen, G. Chen // *Applied Surface Science*. – 2021. – Vol. 567. – P. 150718.
50. The chemical and structural analysis of graphene oxide with different degrees of oxidation / K. Krishnamoorthy, M. Veerapandian, K. Yun, S. Kim // *Carbon*. – 2012. – Vol. 53. – P. 38–49.
51. Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications / Y. Zhu, S. Murali, W. Cai, X. Li,

J.W. Suk, J.R. Potts, R.S. Ruoff // *Advanced Materials*. – 2010. – Vol. 22. – P. 3906–3924.

52. *Chen D., Feng H., Li J.* Graphene oxide: Preparation, functionalization, and electrochemical applications // *Chemical Reviews*. – 2012. – Vol. 112 (11). – P. 6027–6053.

53. *Pei S., Cheng H.M.* The reduction of graphene oxide // *Carbon*. – 2011. – Vol. 50 (9). – P. 3210–3228.

54. *Narayan J., Bezborah K.* Recent advances in the functionalization, substitutional doping and applications of graphene/graphene composite nanomaterials // *RSC Advances*. – 2024. – Vol. 14. – P. 13413–13444.

55. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers / J. Lin, Z. Peng, Y. Liu, F. Ruiz-Zepeda, R. Ye, E.L.G. Samuel, M.J. Yacaman, B.I. Yakobson, J.M. Tour // *Nature Communications*. – 2014. – Vol. 5. – P. 1–12.

56. *Ott A.K., Ferrari A.C.* Raman spectroscopy of graphene and related materials // *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*. – Elsevier, 2024. – P. V2:233–V2:247.

57. Scalable graphene coatings for enhanced condensation heat transfer / D.J. Preston, D.L. Mafra, N. Miljkovic, J. Kong, E.N. Wang // *Nano Letters*. – 2015. – Vol. 15 (5). – P. 2902–2909.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Structural characterization of graphene-coated copper substrate prepared by scalable In-Situ spray coating using xylene dispersion

Sudhakar Vitthalrao Giri^{1, 2, a, *}, Arun Autee^{3, b}, Abhijeet Kadam^{4, c}, Rajendra Shinde^{2, d}

¹ Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University, Chhatrapati Sambhajnagar, Maharashtra, 431004, India

² Department of Mechanical Engineering, CSMS Chhatrapati Shahu College of Engineering, Kanchanwadi, Chhatrapati Sambhajnagar, Maharashtra, 431011, India

³ Department of Mechanical Engineering, Maharashtra Institute of Technology, Beed Bypass Road, Satara Parisar, Gate No. 5, Chhatrapati Sambhajnagar, Maharashtra, 431010, India

⁴ Department of Physics, CSMS Chhatrapati Shahu College of Engineering, Kanchanwadi, Chhatrapati Sambhajnagar, Maharashtra, 431011, India

^a <https://orcid.org/0009-0009-0230-2030>, sudhavgiri@gmail.com; ^b <https://orcid.org/0000-0003-2132-0532>, arun.autee@mit.asia;

^c <https://orcid.org/0000-0002-0593-6145>, arkadam6@gmail.com; ^d <https://orcid.org/0000-0002-5329-1118>, rajendrashinde2222@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 24 May 2026

Revised: 30 May 2026

Accepted: 13 June 2026

Available online: 15 September 2026

Keywords:

Graphene coating
Heat exchanger
Spray coating
Xylene dispersion
Copper substrate
Raman spectroscopy
FTIR analysis
XRD characterization
Few-layer graphene
Thermal management

ABSTRACT

Introduction. Graphene exhibits exceptional thermal conductivity, hydrophobicity, mechanical strength, and electron transport properties, which render it a candidate material for advanced thermal management and heat transfer applications. However, conventional deposition techniques, such as chemical vapor deposition (CVD), are often expensive, technologically complex, and difficult to scale for large-area engineering applications. The present study is focused on the development of a simple, cost-effective, and scalable in-situ spray-coating technique for depositing graphene onto copper substrates using a xylene-based dispersion system. **Materials and methods.** A stable sprayable graphene dispersion was prepared from graphene synthesized using the modified Hummers method and dispersed in a mixture of xylene, isopropanol, epoxy binder, and suspension agents. The coating was deposited onto copper substrates under controlled conditions. Structural and surface characterization of the graphene-coated copper substrate was performed using X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and scanning electron microscopy (SEM). The graphene layer thickness and interlayer spacing were estimated using Bragg's law and the Scherrer equation. **Results and Discussion.** XRD analysis confirmed the formation of few-layer graphene with an interlayer spacing of 3.37 Å and an estimated thickness corresponding to approximately 5–6 graphene layers. Raman spectroscopy revealed the characteristic D, G, and 2D bands, confirming successful graphene deposition on the copper substrate. The I_D/I_G ratio decreased from 2.1 for the as-received graphene powder to 0.85 after coating deposition, indicating preferential deposition of better-dispersed graphene sheets. FTIR analysis suggested Cu–O–C interfacial interactions between graphene and copper. SEM observations revealed uniformly distributed wrinkled graphene sheets forming interconnected conductive pathways across the substrate surface. The crystallographic structure of copper remained unchanged after coating, and no secondary phases were detected. **Conclusions.** The developed xylene-assisted spray-coating process provides a practical and scalable route for depositing graphene on copper substrates. The resulting coating exhibited an interlayer spacing of 3.37 Å, approximately 5–6 graphene layers, characteristic graphene Raman signatures, and a uniform surface morphology. These findings demonstrate the potential of graphene-coated copper substrates for advanced thermal management systems, including condensers, evaporators, phase-change heat exchangers, and high-performance heat-transfer surfaces.

For citation: Giri S.V., Autee A., Kadam A., Shinde R. Structural characterization of graphene-coated copper substrate prepared by scalable In-Situ spray coating using xylene dispersion. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 3, pp. 185–204. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.3-185-204. (In Russian).

References

1. Marzouk S.A., Abou Al-Sood M.M., El-Said E.M.S., Younes M.M., El-Fakharany M.K. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, vol. 148, pp. 7539–7578.
2. Pungaiya S., Kailasanathan C. A review of surface coating technology to increase the heat transfer. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2018, vol. 7 (5), pp. 458–465.

* Corresponding author

Giri Sudhakar Vitthalrao, Ph.D. (Engineering), Research Scholar
 Dr. Babasaheb Ambedkar Marathwada University,
 Chhatrapati Sambhajnagar,
 431004, Maharashtra, India
 Tel.: +91 9850884540, e-mail: sudhavgiri@gmail.com

3. Liu C., Chen M., Yu W., He Y. Recent advance on graphene in heat transfer enhancement of composites. *ES Energy & Environment*, 2018, vol. 2, pp. 31–42. Available at: <http://www.espublisher.com/journals/articledetails/72/> (accessed 11.08.2026).
4. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, vol. 306 (5696), pp. 666–669.
5. Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., Lau C.N. Superior thermal conductivity of single-layer graphene. *Nano Letters*, 2008, vol. 8 (3), pp. 902–907.
6. Ma L., Wang Y., Xu X., Wang Y., Wang C. Structural evolution and thermal conductivity of flexible graphite films prepared by carboxylic graphene/polyimide. *Ceramics International*, 2021, vol. 47 (1), pp. 1076–1085.
7. Wang K., Li M., Zhang J., Lu H. Polyacrylonitrile coupled graphite oxide film with improved heat dissipation ability. *Carbon*, 2019, vol. 144, pp. 249–258.
8. Ghosh S., Bao W., Nika D.L., Subrina S., Pokatilov E.P., Lau C.N., Balandin A.A. Dimensional crossover of thermal transport in few-layer graphene. *Nature Materials*, 2010, vol. 9 (7), pp. 555–558.
9. Ma D., Ding H., Wang X., Yang N., Zhang X. The unexpected thermal conductivity from graphene disk, carbon nanocone to carbon nanotube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 108, pp. 940–944.
10. Ghasemi H., Rajabpour A., Akbarzadeh A.H. Tuning thermal conductivity of porous graphene by pore topology engineering: Comparison of non-equilibrium molecular dynamics and finite element study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 123, pp. 261–271.
11. Subrina S., Kotchetkov D., Balandin A.A. Heat removal in silicon-on-insulator integrated circuits with graphene lateral heat spreaders. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, vol. 30 (12), pp. 1281–1283.
12. Yan Z., Liu G., Khan J.M., Balandin A.A. Graphene quilts for thermal management of high-power GaN transistors. *Nature Communications*, 2012, vol. 3, p. 827.
13. Malekpour H., Chang K.H., Chen J.C., Lu C.Y., Nika D.L., Novoselov K.S., Balandin A.A. Thermal conductivity of graphene laminate. *Nano Letters*, 2014, vol. 14 (9), pp. 5155–5161.
14. Shahil K.M.F., Balandin A.A. Thermal properties of graphene and multilayer graphene: Applications in thermal interface materials. *Solid State Communications*, 2012, vol. 152 (15), pp. 1331–1340.
15. Persson B.N.J., Ueba H. Heat transfer between graphene and amorphous SiO₂. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2010, vol. 22 (46). DOI: 10.1088/0953-8984/22/46/462201.
16. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids. *Applied Physics Letters*, 2006, vol. 89 (15).
17. Li Tong W., Ong W.J., Chai S.P., Tan M.K., Mun Hung Y. Enhanced evaporation strength through fast water permeation in graphene-oxide deposition. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5 (1).
18. Ahn H.S., Kim J.M., Park C., Jang J.-W., Lee J.S., Kim H., Kaviani M., Kim M.H. A novel role of three-dimensional graphene foam to prevent heater failure during boiling. *Scientific Reports*, 2013, vol. 3, p. 1960.
19. Ahn H.S., Kim J.M., Kim J.M., Park S.C., Hwang K., Jo H.J., Kim T., Jerng D.W., Kaviani M., Kim M.H. Boiling characteristics on the reduced graphene oxide films. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, vol. 60, pp. 361–366.
20. Chang H., Wu H. Graphene-based nanomaterials: Synthesis, properties, and optical and optoelectronic applications. *Advanced Functional Materials*, 2013, vol. 23 (16), pp. 1984–1997.
21. Yu X., Cheng H., Zhang M., Zhao Y., Qu L., Shi G. Graphene-based smart materials. *Nature Reviews Materials*, 2017, vol. 2 (9), p. 17046.
22. Sun Z., Chang H. Graphene and graphene-like two-dimensional materials in photodetection: Mechanisms and methodology. *ACS Nano*, 2014, vol. 8 (5), pp. 4133–4156.
23. Renteria J.D., Nika D.L., Balandin A.A. Graphene thermal properties: Applications in thermal management and energy storage. *Applied Sciences*, 2014, vol. 4, pp. 525–547.
24. Schrader M.E. Wettability of clean metal surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1984, vol. 100 (2), pp. 372–380.
25. Sikarwar B.S., Khandekar S., Agrawal S., Kumar S., Muralidhar K. Dropwise condensation studies on multiple scales. *Heat Transfer Engineering*, 2012, vol. 33 (4–5), pp. 301–341.
26. Paxson A.T., Yagüe J.L., Gleason K.K., Varanasi K.K. Stable dropwise condensation for enhancing heat transfer via the initiated chemical vapor deposition (iCVD) of grafted polymer films. *Advanced Materials*, 2014, vol. 26, pp. 418–423.
27. Parin R., Del Col D., Bortolin S., Martucci A. Dropwise condensation over superhydrophobic aluminium surfaces. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, vol. 745, p. 032134.



28. Raj R., Maroo S.C., Wang E.N. Wettability of graphene. *Nano Letters*, 2013, vol. 13, pp. 1509–1515.
29. Rafiee J., Mi X., Gullapalli H., Thomas A.V., Yavari F., Shi Y., Ajayan P.M., Koratkar N.A. Wetting transparency of graphene. *Nature Materials*, 2012, vol. 11, pp. 217–222.
30. Singh E., Thomas A.V., Mukherjee R., Mi X., Houshmand F., Peles Y., Peles Y., Shi Y., Koratkar N.. Graphene drape minimizes the pinning and hysteresis of water drops on nanotextured rough surfaces. *ACS Nano*, 2013, vol. 7 (4), pp. 3512–3521.
31. Thema F.T., Moloto M.J., Dikio E.D., Nyangiwe N.N., Kotsedi L., Maaza M., Khenfouch M. Synthesis and characterization of graphene thin films by chemical reduction of exfoliated and intercalated graphite oxide. *Journal of Chemistry*, 2013, vol. 1, p. 150536.
32. Edwards R.S., Coleman K.S. Graphene synthesis: Relationship to applications. *Nanoscale*, 2013, vol. 5, pp. 38–51.
33. Zhu Y., Murali S., Cai W., Li X., Suk J.W., Potts J.R., Ruoff R.S. Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications. *Advanced Materials*, 2010, vol. 22, pp. 3906–3924.
34. Perrozzi F., Prezioso S., Ottaviano L. Graphene oxide: From fundamentals to applications. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2015, vol. 27.
35. Zhang X., Wan S., Pu J., Wang L., Liu X. Highly hydrophobic and adhesive performance of graphene films. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, vol. 21, pp. 12251–12258.
36. Jaikumar A., Kandlikar S.G., Gupta A. Pool boiling enhancement through graphene and graphene oxide coatings. *Heat Transfer Engineering*, 2017, vol. 38, pp. 1274–1284.
37. Gupta A., Jaikumar A., Kandlikar S.G., Rishi A., Layman A. A multiscale morphological insight into graphene-based coatings for pool boiling applications. *Heat Transfer Engineering*, 2018, vol. 39, pp. 1331–1342.
38. Haque M.R., Betz A.R. Frost formation on aluminum and hydrophobic surfaces. *Proceedings of the ASME 16th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels*, 2018. DOI: 10.1115/ICNMM2018-7609.
39. Haque M.R., Das S.R., Betz A.R. Experimental investigation of condensation and freezing phenomena on hydrophilic and hydrophobic graphene coating. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 160, p. 113987.
40. Hidayah N.M.S., Liu W.W., Lai C.W., Noriman N.Z., Khe C.S., Hashim U., Lee H.C. Comparison on graphite, graphene oxide and reduced graphene oxide: Synthesis and characterization. In: *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1892. DOI: 10.1063/1.5005764.
41. Rodrigues W.L., Mattedi S., Abreu J.C.N. Vapor-liquid equilibria data for binary systems of ethylbenzene + xylene isomers at 100.65 kPa. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2005, vol. 50 (4), pp. 1134–1138.
42. Zhou Y., Wu J., Lemmon E.W. Thermodynamic properties of o-xylene, m-xylene, p-xylene, and ethylbenzene. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 2012, vol. 41 (2).
43. Johnson D.W., Dobson B.P., Coleman K.S. A manufacturing perspective on graphene dispersions. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 2015, vol. 20, pp. 367–382.
44. Parviz D., Das S., Ahmed H.S.T., Irin F., Bhattacharia S., Green M.J. Dispersions of non-covalently functionalized graphene with minimal stabilizer. *ACS Nano*, 2012, vol. 6 (10), pp. 8857–8867. DOI: 10.1021/nn302784m.
45. Umadevi D., Panigrahi S., Sastry G.N. Noncovalent interaction of carbon nanostructures. *Accounts of Chemical Research*, 2014, vol. 47 (8), pp. 2574–2581.
46. Vasileiou A.A., Docoslis A., Kontopoulou M., Xiang P., Ye Z. The role of non-covalent interactions and matrix viscosity on the dispersion and properties of LLDPE/MWCNT nanocomposites. *Polymer*, 2013, vol. 54 (19), pp. 5230–5240.
47. Nishio M. The CH/ π hydrogen bond in chemistry. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011, vol. 13 (31), pp. 13873–13900.
48. Waller M.P., Robertazzi A., Platts J.A., Hibbs D.E., Williams P.A. Hybrid density functional theory for π -stacking interactions: Application to benzenes, pyridines, and DNA bases. *Journal of Computational Chemistry*, 2006, vol. 27 (4), pp. 491–504.
49. Liu Z., Gao H., Wen S., Lin H., Chen X., Chen G. The influence of xylene content on the dispersion of graphene in aromatic petroleum resin by solution mixing. *Applied Surface Science*, 2021, vol. 567, p. 150718.
50. Krishnamoorthy K., Veerapandian M., Yun K., Kim S. The chemical and structural analysis of graphene oxide with different degrees of oxidation. *Carbon*, 2012, vol. 53, pp. 38–49.
51. Zhu B.Y., Murali S., Cai W., Li X., Suk J.W., Potts J.R., Ruoff R.S. Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications. *Advanced Materials*, 2010, vol. 22, pp. 3906–3924.

52. Chen D., Feng H., Li J. Graphene oxide: Preparation, functionalization, and electrochemical applications. *Chemical Reviews*, 2012, vol. 112 (11), pp. 6027–6053.
53. Pei S., Cheng H.M. The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 2011, vol. 50 (9), pp. 3210–3228.
54. Narayan J., Bezborah K. Recent advances in the functionalization, substitutional doping and applications of graphene/graphene composite nanomaterials. *RSC Advances*, 2024, vol. 14, pp. 13413–13444.
55. Lin J., Peng Z., Liu Y., Ruiz-Zepeda F., Ye R., Samuel E.L.G., Yacaman M.J., Yakobson B.I., Tour J.M. Laser-induced porous graphene films from commercial polymers. *Nature Communications*, 2014, vol. 5, pp. 1–12.
56. Ott A.K., Ferrari A.C. Raman spectroscopy of graphene and related materials. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*. Elsevier, 2024, pp. V2:233–V2:247.
57. Preston D.J., Mafra D.L., Miljkovic N., Kong J., Wang E.N. Scalable graphene coatings for enhanced condensation heat transfer. *Nano Letters*, 2015, vol. 15 (5), pp. 2902–2909.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).