

Исследование механических характеристик слоистых структур на основе углеродных наноматериалов для создания биоэлектронных компонентов

© Д.Т. Мурашко,¹ У.Е. Курилова,^{1,2} К.Д. Попович,^{1,2} А.В. Куксин,¹ А.Ю. Герасименко^{1,2}

¹Институт биомедицинских систем, Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, 124498 Москва, Зеленоград, Россия

²Институт бионических технологий и инжиниринга, Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, 119991 Москва, Россия
e-mail: skorden@outlook.com

Поступило в Редакцию 13 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 13 декабря 2024 г.

Принято к публикации 13 декабря 2024 г.

Представлена технология формирования слоистых структур на основе углеродных наноматериалов, предназначенных для создания биоэлектронных компонентов. Структуры сформированы при помощи метода спрей-осаждения и упорядочивания слоев из одностенных углеродных нанотрубок и восстановленного оксида графена. При использовании лазерного излучения наносекундного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1064 nm и плотностью энергии 0.12 J/cm² были сформированы вертикально упорядоченные сложные древообразные структуры из одностенных углеродных нанотрубок и восстановленного оксида графена. Показано, что при воздействии лазерным излучением твердость образцов возросла в 1.5–2 раза, а модуль упругости увеличился в 1.2–1.5 раза. Была определена адгезия образцов слоистых структур на основе одностенных углеродных нанотрубок и гибридного состава — нанотрубки + восстановленный оксид графена. При оценке царапин получено, что образцы, упорядоченные лазерным излучением, способны выдерживать нагрузки вплоть до 40 mN.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, восстановленный оксид графена, биоэлектроника, твердость, модуль упругости, адгезия.

DOI: 10.61011/JTF.2025.05.60279.441-24

Введение

На данный момент актуальность разработки биоэлектронных компонентов обусловлена стремительным развитием технологий и необходимостью решения новых задач в области биомедицины. Одним из направлений применения биоэлектронных компонентов является создание нейроинтерфейсов. В ходе разработки нейроинтерфейсов важно учитывать ряд ключевых аспектов, таких, как биосовместимость, механическая прочность и гибкость, размеры и объем, электропроводность. Таким образом, на этапе разработки важно подобрать такие материалы, которые смогут обеспечить выполнение условий, связанных с ключевыми аспектами разрабатываемых биоэлектронных компонентов.

Одними из наиболее перспективных материалов для создания биоэлектронных компонентов, в том числе для применения в качестве нейроинтерфейсов, являются углеродные наноматериалы [1]. Углеродные наноматериалы, такие, как углеродные нанотрубки и восстановленный оксид графена, представляют значительный интерес благодаря своим высоким электропроводящим свойствам [2,3], биосовместимости [4,5], механическим характеристикам [6,7] и возможности модификации [8,9]. Одной из ключевых особенностей углеродных нанома-

териалов являются механическая прочность и гибкость. Благодаря подобным свойствам, при возможном использовании внутри тела человека может быть обеспечена долгосрочная эксплуатация. При нахождении внутри тела человека биоэлектронные компоненты будут непрерывно подвергаться механическим нагрузкам со стороны окружающих тканей и движений тела. В связи с этим важно убедиться, что материал обладает достаточной прочностью, чтобы выдерживаться непрерывные нагрузки, вызванные деформацией, давлением и трением, и при этом обладать достаточной гибкостью, чтобы не вызывать избыточной нагрузки на окружающие клетки и ткани. В таком случае важно учитывать такие механические свойства, как твердость, упругость и адгезия. Исследование твердости и модуля упругости позволяет оценить степень механической стабильности и долговечности, при которых биоэлектронные компоненты способны выдерживать нагрузки [10,11]. Более того, твердость и упругость способны оказать влияние на рост и адгезию клеток устройства, при этом не оказывая избыточного давления на них [12]. Исследование адгезии позволяет оценить степень контакта при взаимодействии с клетками и тканями организма [13]. Соблюдение требований адгезии позволяет обеспечить долговечность работы устройства, эффективную переда-

чу сигнала через интерфейс „материал–ткань“, а также позволяет упростить процесс производства, так как материалы с высокой адгезией проще интегрировать в сложные конструкции, что в последствие упрощает процесс сборки. Известно, что использование лазерного излучения позволяет улучшить механические свойства углеродных наноматериалов за счет образования дефектов в кристаллической решетке и формирования новых связей между атомами углерода. Благодаря этому возможно формирование слоистых структур на основе углеродных наноматериалов, применяемых для создания биоэлектронных компонентов.

В настоящей работе рассмотрена технология формирования образцов слоистых структур на основе углеродных наноматериалов при помощи методов спрей-осаждения и упорядочивания лазерным излучением. Получены результаты исследования морфологии и механических характеристик. Проведены исследования адгезии при помощи метода нанесения царапин и оценки повреждения слоистых структур на основе углеродных наноматериалов.

1. Материалы и методы исследований

1.1. Формирование слоистых структур на основе углеродных наноматериалов для создания биоэлектронных компонентов

Образцы слоистых структур на основе углеродных наноматериалов, использующихся для создания биоэлектронных компонентов, формировались на n -допированных $4.5 \Omega \cdot \text{cm}$, (100) ориентированных кремниевых четырехдюймовых пластинах (Si-Mat, Ландсберг-на-Лехе, Германия). Данные пластины были нарезаны в виде прямоугольных пластин с размерами $10 \times 5 \text{ mm}$. Далее пластины были обработаны в растворе Piranha, после чего на них наносилась каталитическая пара Ti (10 nm) и Ni (2 nm) методом электронно-лучевого осаждения. Для формирования слоистых структур были подготовлены гомогенные дисперсные среды, которые содержали одноатомные углеродные нанотрубки (ОУНТ) (ООО „Универсальные добавки“, г. Новосибирск, Россия), восстановленный оксид графена (вОГ) (ООО „Графенос“, г. Черноголовка, Россия) и гибридный состав, включающий ОУНТ и вОГ. Концентрация компонентов составляла 0.1 mg/ml для отдельных дисперсных сред с ОУНТ и вОГ и 0.05/0.05 mg/ml для гибридного состава. В качестве растворителя использовалась дистиллированная вода. Приготовленные дисперсные среды были нанесены на поверхность пластин методом спрей-осаждения. Для этого пластины располагались на нагревательном столике с целью испарения жидкости в процессе напыления. Температура нагревательного стола составляла 70°C . Дисперсная среда была нанесена послойно вплоть до 50 слоев.

1.2. Лазерное упорядочивание слоистых структур на основе углеродных наноматериалов для создания биоэлектронных компонентов

Для увеличения значений механических характеристик было выполнено упорядочивание сформированных на подложке слоев путем лазерного воздействия. Лазерное упорядочивание было выполнено при помощи импульсного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1064 nm, длительностью импульса 100 ns, частотой 30 kHz и плотностью энергии лазерного излучения в диапазоне $0.12\text{--}0.46 \text{ J/cm}^2$. Позиционирование лазерного луча на плоскости обеспечивалось с помощью гальванометрического сканера с двумя зеркалами. Точность осуществляемого позиционирования составляла $(1.0 \pm 0.2) \mu\text{m}$. Для фокусировки лазерного излучения использовался объектив с фокусным расстоянием 210 mm до диаметра лазерного луча $35 \mu\text{m}$. Пространственный профиль линейно поляризованного излучения имел форму гауссового распределения. Для равномерного распределения излучения по всей облучаемой области в установке предусмотрен датчик расстояния.

Для упорядочивания слоистых структур на основе углеродных наноматериалов в программном обеспечении задавалась траектория движения лазерного излучения. Траектория, в соответствии с которой происходило упорядочивание слоистых структур на подложке, имела прямоугольную форму и покрывала всю площадь образца. Для формирования топологии биоэлектронного компонента была задана другая траектория, представленная на рис. 1. Обе траектории представляли собой набор параллельных линий, расстояние между которыми составляло $17 \mu\text{m}$. Расстояние между линиями было подобрано таким образом, чтобы они частично перекрывали друг друга. При этом каждая линия также состояла из лазерных импульсов, которые накладывались друг на друга. Скорость движения луча вдоль траектории составляла 240 mm/s . Длина линий вдоль движения лазерных импульсов находилась в диапазоне 5–10 mm. Схематичное изображение процесса формирования образцов слоистых структур на основе углеродных наноматериалов для создания биоэлектронных компонентов представлено на рис. 1.

В результате для исследования были подготовлены следующие образцы упорядоченных слоистых структур на подложке: 1 — ОУНТ; 2 — ОУНТ, упорядоченные лазерным излучением; 3 — вОГ; 4 — вОГ, упорядоченные лазерным излучением; 5 — гибридные структуры ОУНТ и вОГ; 6 — гибридные структуры ОУНТ и вОГ, упорядоченные лазерным излучением. В качестве контрольного образца выступала подложка из кремниевой пластины.

1.3. Растровая электронная микроскопия

Исследование структурных особенностей образцов на кремниевых пластинах проводилось при помощи растро-

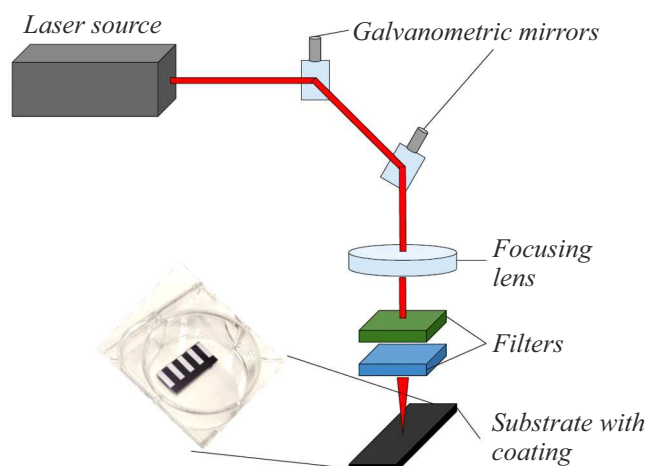


Рис. 1. Процесс упорядочивания образцов слоистых структур на основе углеродных наноматериалов с задаваемой топологией биоэлектронных компонентов.

вой электронной микроскопии (РЭМ), с использованием микроскопа FEI Helios NanoLab 650 (FEI Ltd., Hillsboro, OR, USA). Ускоряющее напряжение электронной колонны составляло 5 kV, ток электронного зонда — 86 pA для образцов с ОУНТ, ВОГ и ОУНТ + ВОГ. Давление в вакуумной камере составляло $7.04 \cdot 10^{-4}$ Па. Образцы закреплялись на проводящей подложке при помощи углеродного скотча.

1.4. Измерение механических характеристик

Исследование механических характеристик проводилось при помощи сканирующего нанотвердомера „НаноСкан-4D Компакт“ (НаноСкан, г. Троицк). Для определения твердости и модуля упругости был применен метод наноиндентирования, при помощи которого была проведена серия испытаний для каждого из образцов. Суть метода заключается во вдавливании наконечника заданной формы в поверхность материала с одновременной регистрацией зависимостей прикладываемой нагрузки от глубины внедрения наконечника. В качестве наконечника использовался индентор формы Берковича, который представлял собой трехгранную пирамиду. Геометрические размеры индентора были следующие: радиус закругления острия менее 100 nm; угол между осью пирамиды и гранью — 65.3° ; эквивалентный угол конуса — 70.32° . Измерения твердости и модуля упругости методом наноиндентирования выполнялись в режиме измерения по глубине. Для каждого из образцов было выполнено 10 измерений, которые затем были усреднены. В ходе измерения индентор плавно погружался в образец до глубины 200 nm, одновременно регистрируя кривые изменения $F-h$. Время приложения нагрузки и ее снятия составляло 30 s, время удержания максимальной нагрузки — также 30 s. Расстояние между точками измерений составляло $100 \mu\text{m}$ во избежание

наложения отпечатков друг на друга. Время регистрации температурного дрейфа составляло 15 s, учитываемый процент температурного дрейфа — 10%. Ввиду того, что в качестве подложек применялись кремниевые пластины, для расчета модуля упругости коэффициент Пуассона был принят равным 0.265.

1.5. Исследование адгезии

Для анализа адгезии был использован метод скретч-теста, выполненный при помощи сканирующего нанотвердомера „НаноСкан-4D Компакт“. Для этого на поверхность образцов наносились царапины с нагрузкой в диапазоне 20–60 mN и длиной $500 \mu\text{m}$. Время приложения и удержания максимальной нагрузки составляло 30 s. Расстояние между царапинами составляло $100 \mu\text{m}$. После нанесения царапин была выполнена оценка характера повреждения покрытия, которая характеризовалась шириной и глубиной царапин.

2. Эксперимент

2.1. Морфология слоистых структур на основе углеродных наноматериалов для создания биоэлектронных компонентов

Внешний вид слоистых структур на основе углеродных наноматериалов, полученных в результате напыления на подложки и лазерного упорядочивания, представлен на рис. 2.

Из приведенных изображений видно, образец ОУНТ до лазерного упорядочивания представляет собой пучки нанотрубок, которые неравномерно расположены по поверхности подложки и послойно наложены друг на друга (рис. 2, *a*). Послойное наложение может быть объяснено методом формирования образца, а именно спрей-осаждением. Размер наружного диаметра нанотрубок составляет $(1.6 \pm 0.4) \text{ nm}$, а их длина составляла более $5 \mu\text{m}$. В случае образца ВОГ можно увидеть, что его поверхность представляет собой неоднородный монослой, состоящий из частичек ВОГ, частично перекрывающих друг друга (рис. 2, *b*). Сами частицы представляли собой неравномерные листы с размерами в диапазоне от 500–1000 nm. Внешний вид гибридного состава ОУНТ и ВОГ (рис. 2, *c*) представлял собой плотно нанесенную слоистую структуру, в которой можно отличить как отдельные пучки нанотрубок, так и листы ВОГ. При этом видно, что получившаяся структура практически равномерно занимает поверхность подложки на рассматриваемом участке.

Известно, что под влиянием лазерного излучения между углеродными нанотрубками образуются ковалентные связи C–C [14]. Образование данных связей возможно в областях дефектов углеродных нанотрубок за счет слабой теплопроводности и интенсивности излучения. Таким образом, углеродные нанотрубки образуют взаимосвязанные сети, которые приводят к увеличению

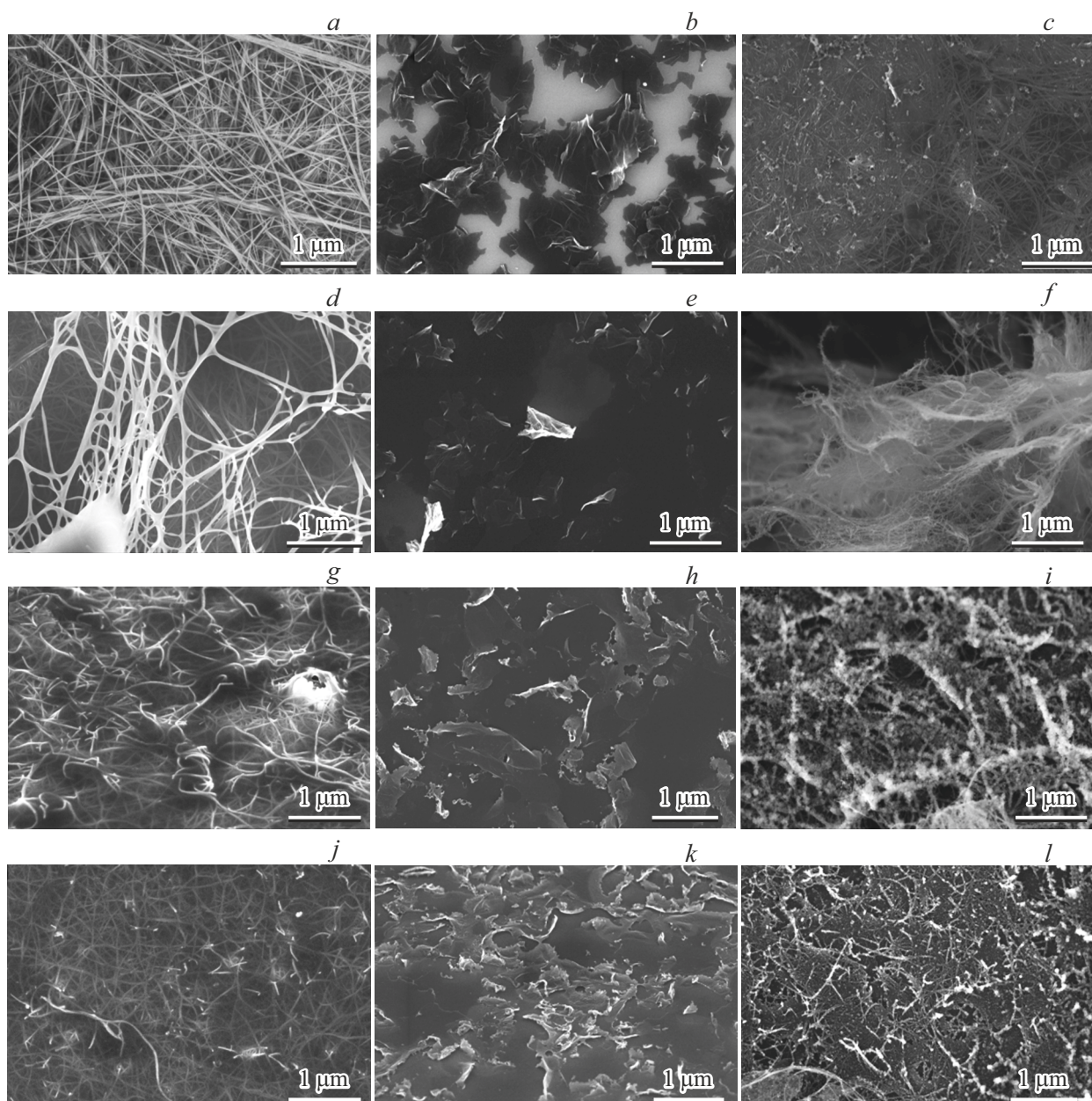


Рис. 2. РЭМ изображения образцов слоистых структур на основе ОУНТ (*a, d, g, j*), ВОГ (*b, e, h, k*) и гибридного состава ОУНТ и ВОГ (*c, f, i, l*) при различных условиях воздействия лазерного излучения: без использования лазерного излучения (*a–c*); с воздействием лазерного излучения с плотностью энергии 0.12 J/cm^2 (*d–f*); с воздействием лазерного излучения с плотностью энергии 0.24 J/cm^2 (*g–i*); с воздействием лазерного излучения с плотностью энергии 0.46 J/cm^2 (*j–l*).

механических характеристик в сравнении с исходными образцами [15]. Исходя из этого, можно сделать вывод, что морфология исследуемых образцов может оказывать влияние на механические характеристики образцов в зависимости от используемой плотности энергии. Был проведен анализ морфологии слоистых структур на основе углеродных наноматериалов в зависимости от используемой плотности энергии лазерного излучения.

Для упорядочивания слоистых структур на основе углеродных наноматериалов было экспериментально подобрано значение плотности энергии лазерного излучения,

при котором возможно упорядочивание ОУНТ и ВОГ в их областях дефектов, за счет чего формируется упорядоченная слоистая структура. Для этого плотность энергии лазерного излучения должна находиться в диапазоне $0.12–0.46 \text{ J/cm}^2$. Нижняя граница данного диапазона была экспериментально подобрана, так как ниже данного значения не было замечено упорядочения в образцах. Упорядочивание и связывание ОУНТ и ВОГ происходило в случае, когда плотность энергии лазерного излучения $\geq 0.12 \text{ J/cm}^2$. При этом происходит поглощение энергии лазерного излучения, которое приводит к образованию в

Таблица 1. Значения твердости образцов слоистых структур на основе углеродных наноматериалов в исходном виде и после упорядочивания лазерным излучением

Образцы	Плотность энергии лазерного излучения, J/cm ²	
	0	0.12
	Твердость, GPa	
Кремниевая пластина	0.56 ± 0.29	
ОУНТ	22.59 ± 4.01	38.56 ± 4.91
вОГ	21.5 ± 8.29	34.34 ± 1.56
Гибридный состав ОУНТ и вОГ	20.38 ± 4.57	37.05 ± 8.30

гексагональной структуре углеродных нанотрубок одно- или многоатомных вакансий на их поверхности [16,17]. Как результат, вОГ и ОУНТ образуют соединения, образующие пары из семи- и пятиугольников атома углерода [18].

При рассмотрении изображений образцов ОУНТ, упорядоченных лазерным излучением с плотностью энергии 0.12 J/cm² (рис. 2, *d*), можно обнаружить, что ОУНТ образовали между собой многочисленные связи. Данные связи, в свою очередь, образуют разветвленные сети, опирающиеся на нижние слои слоистой структуры. В результате приповерхностный слой слоистой структуры представлял собой каркас из стоячих сетей ОУНТ. В случае образца вОГ (рис. 2, *e*) видно, что под воздействием лазерного излучения частицы графена частично приподнимались над поверхностью подложки. В то же время другая часть данных частиц была либо прижата, либо приварена к поверхности подложки. В случае гибридного состава ОУНТ и вОГ (рис. 2, *f*) видно, что в результате воздействия лазерного излучения были сформированы вертикально упорядоченные сложные древообразные структуры, включающие сети из ОУНТ, связанные мостовыми соединениями с частицами вОГ. Высота структур составляла около 30 μm. Также можно заметить, что соединения из ОУНТ покрывают большую часть поверхности частиц вОГ.

При рассмотрении образцов ОУНТ, упорядоченных лазерным излучением с плотностью энергии 0.24 J/cm² (рис. 2, *g*), видно, что стоячие сети по аналогии с предыдущим образцом не были образованы. Можно также наблюдать, что сами ОУНТ имеют скрученный вид и образуют малочисленные связи. При этом замечено, что у значительной части углеродных нанотрубок наблюдаются обрывы структуры. В образце вОГ (рис. 2, *h*) заметны частичные повреждения частиц оксида графена. При этом можно обнаружить наличие частиц, часть которых, так же, как и в предыдущем случае, была приподнята над подложкой. При рассмотрении образца гибридного состава (рис. 2, *i*) заметно меньшее количество упорядоченных сложных древообразных структур. Наблюдается образование значительного количества

аморфного углерода на поверхностях ОУНТ и структур из ОУНТ и вОГ. Из рассмотренных изображений можно сделать вывод, что при воздействии лазерного излучения с плотностью энергии 0.24 J/cm² превышает порог, при котором начинается упорядочивание слоистых структур на основе углеродных наноматериалов.

При рассмотрении образцов ОУНТ, упорядоченных лазерным излучением с плотностью энергии 0.46 J/cm² (рис. 2, *j*), видно, что значимая часть приповерхностного слоя была повреждена. Можно также увидеть значимое количество обрывов на концах ОУНТ, при этом не обнаружено возникновения пар взаимного соединения между ОУНТ. В случае образца вОГ (рис. 2, *k*) обнаружены значительные повреждения поверхности частиц вОГ. Высокоинтенсивное воздействие лазерным излучением не приводило к упорядочиванию сложных древообразных структур, образованных гибридным составом ОУНТ и вОГ (рис. 2, *l*). На поверхностях ОУНТ обнаружено значительное количество аморфного углерода, образованного воздействием лазерного излучения. Связей между ОУНТ и вОГ не обнаружено. Из приведенных изображений можно сделать вывод о том, что при воздействии лазерного излучения с плотностью энергии 0.46 J/cm² происходит значительное превышение порога, при котором происходит упорядочивание слоистых структур на основе углеродных наноматериалов, что ведет к значительным повреждениям образцов.

2.2. Результаты измерений механических характеристик

Анализ результатов исследования морфологии образцов слоистых структур на основе углеродных наноматериалов показал, что для исследования механических характеристик наиболее целесообразным будет проведение измерений образцов до воздействия лазерного излучения и образцов, упорядоченных лазерным излучением с плотностью энергии 0.12 J/cm². В качестве контрольного образца выступала кремниевая пластина. Результаты измерения твердости приведены в табл. 1.

Для наглядности полученные результаты представлены на рис. 3.

Таблица 2. Значения модуля образцов слоистых структур на основе углеродных наноматериалов в исходном виде и после упорядочивания лазерным излучением

Образцы	Плотность энергии лазерного излучения, J/cm ²	
	0	0.12
	Модуль упругости, GPa	
Кремниевая пластина	31.89 ± 13.91	
ОУНТ	204.80 ± 20.85	233.12 ± 18.70
вОГ	197.66 ± 38.62	235.89 ± 3.85
Гибридный состав ОУНТ и вОГ	195.10 ± 18.49	281.69 ± 3.74

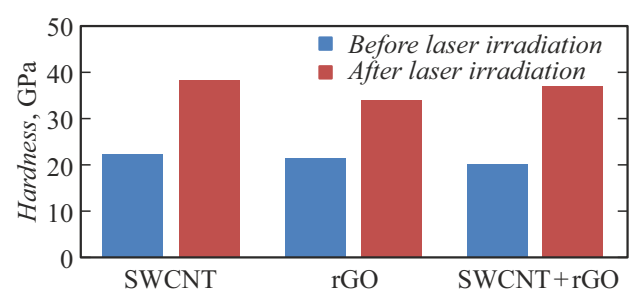


Рис. 3. Твердость образцов слоистых структур на основе углеродных наноматериалов.

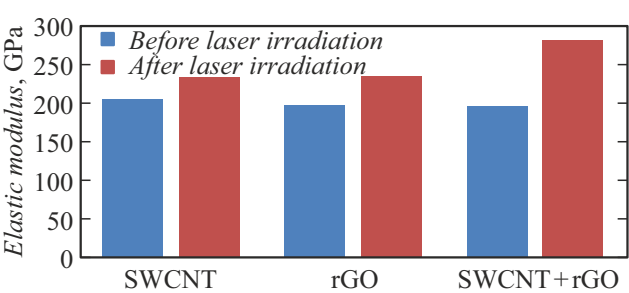


Рис. 4. Модуль упругости образцов слоистых структур на основе углеродных наноматериалов.

Видно, что под влиянием структурных изменений, происходящих при упорядочивании слоистых структур лазерным излучением, твердость увеличилась до 1.5–2 раз. Данные изменения значений твердости свидетельствуют об эффективном упорядочивании углеродных наноматериалов в слоистых наноструктурах, что является важным условием для формирования биоэлектронных компонентов. Наличие высоких значений твердости может обеспечить образцам сохранение своей формы и структуры под воздействием механических нагрузок внутри организма, что положительно скажется на стабильности и долговечности разрабатываемых биоэлектронных компонентов.

Результаты измерения модуля упругости приведены в табл. 2.

Для наглядности полученные результаты представлены на рис. 4.

Из полученных значений видно, что, по аналогии с твердостью, при воздействии лазерного излучения упорядочивание слоистых структур также повлияло и на модуль упругости. В сравнении с изначальными значениями образцов до воздействия лазерного излучения произошло увеличение модуля упругости в 1.2–1.5 раза. Подобные значения модуля упругости могут оказывать достаточное сопротивление деформации внутри организма, что также является важным условием при создании биоэлектронных компонентов.

2.3. Исследование адгезии

В результате исследования морфологии образцов было получено, что образец слоистых структур на основе вОГ представляет собой неравномерный монослой. В связи с этим было принято решение исследовать адгезию образцов слоистых структур, обладающих более плотным и равномерным покрытием на подложке, т.е. образцы слоистых структур на основе ОУНТ и гибридного состава ОУНТ и вОГ. Внешний вид царапин образцов слоистых структур на основе ОУНТ представлен на рис. 5.

При оценке образца ОУНТ без воздействия лазерного излучения видно, что покрытие слоистой структуры начинает отделяться от подложки при воздействии силы в 40 mN (рис. 5, a). Аналогичным образом покрытие начинает отходить при воздействии силы в 40 mN на образце, упорядоченном при воздействии лазерного излучения с плотностью энергии 0.12 J/cm² (рис. 5, b). Однако при оценке образцов, упорядоченных при лазерном воздействии с плотностями энергии 0.24 и 0.46 J/cm², видно (рис. 5, c, d), что покрытие начинает отделяться от подложки уже при воздействии силы в 20 mN. Данный эффект может быть связан с морфологией слоистых структур, которые были в значительной степени повреждены в процессе упорядочивания лазерным излучением. В то же время, несмотря на формирование каркаса из стоячих сетей в приповерхностном слое, на образ-

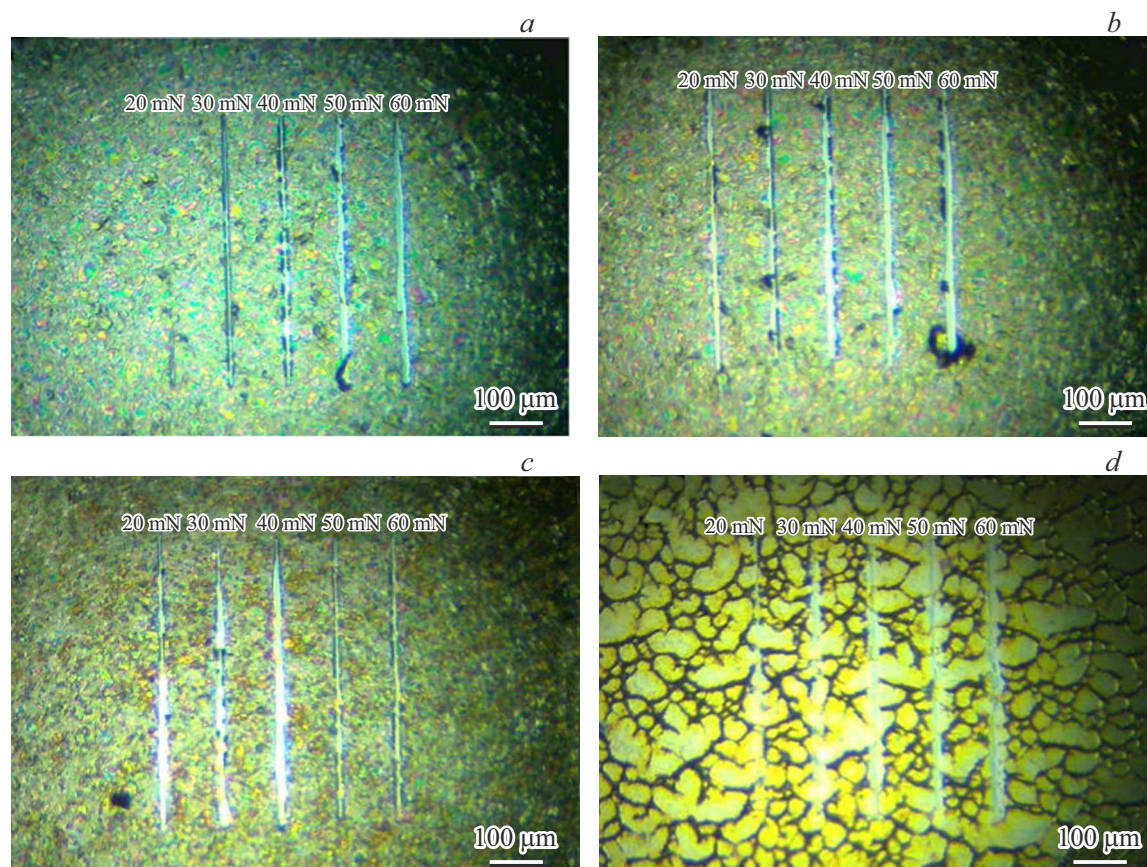


Рис. 5. Внешний вид царапин на поверхности образцов слоистых структур на основе ОУНТ без использования лазерного излучения (*a*) и упорядоченных при помощи лазерного излучения с плотностью энергии: *b* — 0.12 J/cm^2 ; *c* — 0.24 J/cm^2 ; *d* — 0.46 J/cm^2 .

це, упорядоченном при плотности энергии лазерного излучения 0.12 J/cm^2 , при усилении его механических характеристик не было замечено улучшения адгезии. Предположительно необходимо провести дополнительные исследования по оценке царапин, нанесенных под воздействием силы в промежутке от 30 до 40 мН.

Внешний вид царапин образцов гибридного состава ОУНТ и вОГ представлен на рис. 6.

При оценке образца слоистых структур гибридных структур гибридного состава ОУНТ и вОГ, не подвергавшегося упорядочиванию лазерным излучением, видно, что покрытие начинает отделяться от подложки при воздействии силы 40 мН. Аналогичным образом, при воздействии силой 40 мН в значительной степени от подложки начала отделяться слоистая структура на основе гибридного состава ОУНТ и вОГ, подвергшаяся воздействию лазерного излучения с плотностью энергии 0.12 J/cm^2 . В случае образцов слоистых структур на основе гибридного состава ОУНТ и вОГ, подвергшихся воздействию лазерного излучения с плотностями энергии 0.24 и 0.46 J/cm^2 , видно, что покрытие отделялось при воздействии силы 20 мН. Данная тенденция соответствует изменениям в морфологии слоистых структур при воздействии лазерного излучения с плотностями

мощности 0.24 и 0.46 J/cm^2 , при которых происходили значительные повреждения в приповерхностных слоях. В случае образца, облученного лазерным излучением с плотностью энергии 0.12 J/cm^2 , требуются дополнительные исследования для установления силы, при которой происходит отрыв покрытия в диапазоне 30–40 мН.

Заключение

Представлены результаты исследований слоистых структур на основе углеродных наноматериалов, предназначенных для изготовления компонентов биоэлектронных устройств. Предложена технология формирования топологии слоистых структур на основе углеродных наноматериалов с применением методов послойного спрей-осаждения ОУНТ, вОГ и гибридного состава ОУНТ и вОГ с последующим упорядочиванием при помощи лазерного излучения с различной плотностью энергии. Получено, что при воздействии лазерного излучения с плотностью энергии $\geq 0.12 \text{ J/cm}^2$ в верхних слоях слоистых структур образуются многочисленные связи между ОУНТ и вОГ. За счет образовавшихся связей получены вертикально упорядоченные сложные

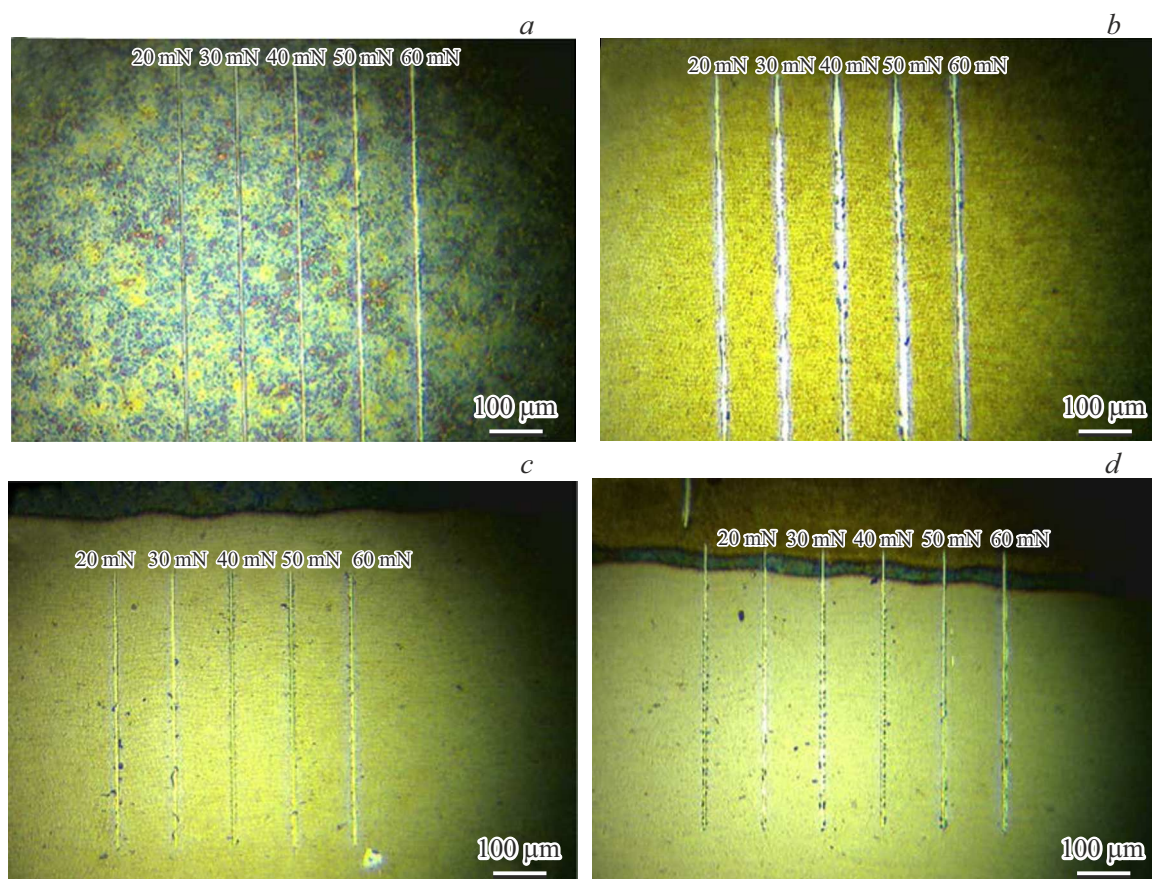


Рис. 6. Внешний вид царапин на поверхности образцов слоистых структур на основе гибридного состава ОУНТ и вОГ без использования лазерного излучения (*a*) и упорядоченных при помощи лазерного излучения с плотностью энергии: *b* — 0.12 J/cm^2 ; *c* — 0.24 J/cm^2 ; *d* — 0.46 J/cm^2 .

древообразные структуры, включающие сети из ОУНТ, связанные мостовыми соединениями с частицами вОГ. Такие упорядоченные слоистые структуры обладают улучшенными механическими свойствами в сравнении с неупорядоченными слоистыми структурами. При воздействии лазерным излучением с плотностью энергии 0.12 J/cm^2 значения твердости образцов ОУНТ, вОГ и гибридного состава ОУНТ и вОГ увеличились в 1.5–2 раза по сравнению с исходными образцами и составили (38.56 ± 4.91) , (34.34 ± 1.56) и (37.05 ± 8.30) GPa соответственно. Также при воздействии лазерным излучением с плотностью энергии 0.12 J/cm^2 значения модуля упругости образцов ОУНТ, вОГ и гибридного состава ОУНТ и вОГ увеличились в 1.2–1.5 раза и составили (233.12 ± 18.70) , (235.89 ± 3.85) и (281.69 ± 3.74) GPa соответственно. Полученные значения твердости и модуля упругости могут обеспечить сохранение формы и структуры образцов под воздействием механических нагрузок внутри организма, а также могут обеспечивать сопротивление деформации внутри организма, соответствующее стабильности и долговечности биоэлектронных компонентов. В особенности это относится к нейроинтерфейсам, которые предполагают долгосрочную

имплантацию в область спинного мозга на период до 10 лет. Была также определена адгезия образцов слоистых структур на основе ОУНТ и гибридного состава ОУНТ и вОГ. При оценке царапин получено, что образцы, упорядоченные лазерным излучением 0.12 J/cm^2 , способны выдерживать нагрузки вплоть до 40 mN. Таким образом, исследования упорядоченных слоистых структур на основе углеродных наноматериалов указывают на перспективность их применения в качестве биоэлектронных компонентов, например, нейроинтерфейсов для диагностики или терапии, имплантируемых в организм.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-15-2024-555 от 25 апреля 2024 года.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Scaini, L. Ballerini. *Current Opinion in Neurobiology*, **50**, 50 (2018). DOI: 10.1016/j.conb.2017.12.009
- [2] X. Zhang, W. Lu, G. Zhou, Q. Li. *Adv. Mater.*, **32** (5), 1902028 (2020). DOI: 10.1002/adma.201902028
- [3] Y. Wang, Y. Chen, S.D. Lacey, L. Xu, H. Xie, T. Li, V.A. Danner, L. Hu. *Mater. Today*, **21** (2), 186 (2018). DOI: 10.1016/j.mattod.2017.10.008
- [4] A.Yu. Gerasimenko, U.E. Kurilova, M.S. Savelyev, D.T. Murashko, O.E. Glukhova. *Compos. Structures*, **260**, 113517 (2021). DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113517
- [5] A.Yu. Gerasimenko, E. Kitsyuk, U.E. Kurilova, I.A. Suetina, L. Russu, M.V. Mezentseva, A. Markov, A.N. Narovlyansky, S. Kravchenko, S.V. Selishchev, O.E. Glukhova. *Polymers*, **14** (9), 1866 (2022). DOI: 10.3390/polym14091866
- [6] A. Kumar, K. Sharma, A.R. Dixit. *Carbon Lett.*, **31** (2), 149 (2021). DOI: 10.1007/s42823-020-00161-x
- [7] Y. Li, S. Wang, Q. Wang, M. Xing. *Compos. Part B: Eng.*, **133**, 35 (2018). DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.09.024
- [8] G. Yu, Y. Lu, J. Guo, M. Patel, A. Bafana, X. Wang, B. Qiu, C. Jeffries, S. Wei, Z. Guo, E.K. Wujcik. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **1**, 56 (2018). DOI: 10.1007/s42114-017-0004-3
- [9] H. Beitollahi, F. Movahedifar, S. Tajik, S. Jahani. *Electroanalysis*, **31** (7), 1195 (2019). DOI: 10.1002/elan.201800370
- [10] N.A. Demidenko, A.V. Kuksin, D.T. Murashko, N.G. Cherepanova, A.E. Semak, V.N. Bychkov, A.S. Komarchev, E.M. Eganova, A.A. Dudin, A.A. Pavlov, A.Y. Gerasimenko. *3D printed optics and additive photonic manufacturing II*, **11349**, 60 (2020). DOI: 10.1117/12.2564679
- [11] Y. Liu, J. Liu, S. Chen, T. Lei, Y. Kim, S. Niu, H. Wang, X. Wang, A.M. Foudeh, J.B.-H. Tok, Z. Bao. *Nature Biomed. Eng.*, **3** (1), 58 (2019). DOI: 10.1038/s41551-018-0335-6
- [12] F. Sharifianjazi, A. Esmailkhanian, M. Moradi, A. Pakseresht, M.S. Asl, H. Karimi-Maleh, H.W. Jang, M. Shokouhimehr, R.S. Varma. *Mater. Sci. Eng.: B*, **264**, 114950 (2021). DOI: 10.1016/j.mseb.2020.114950
- [13] S. Li, Y. Cong, J. Fu. *J. Mater. Chem. B*, **9** (22), 4423 (2021). DOI: 10.1039/D1TB00523E
- [14] A.Y. Gerasimenko, A.V. Kuksin, Y.P. Shaman, E.P. Kitsyuk, Y.O. Fedorova, A.V. Sysa, A.A. Pavlov, O.E. Glukhova. *Nanomaterials*, **11**, 1875 (2021). DOI: 10.3390/NANO11081875
- [15] A.Y. Gerasimenko, O.E. Glukhova, G.V. Savostyanov, V.M. Podgaetsky. *J. Biomed. Opt.*, **22** (6), 065003 (2017). DOI: 10.1117/1.JBO.22.6.065003
- [16] A.V. Krashennnikov, K. Nordlund, M. Sirviö, E. Salonen, J. Keinone. *Phys. Rev. B*, **63** (24), 245405 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevB.63.245405
- [17] S. Zhang, S.L. Mielke, R. Khare, D. Troya, R.S. Ruoff, G.C. Schatz, T. Belytschko. *Phys. Rev. B — Condens. Matter Mater. Phys.*, **71** (11), 115403 (2005).
- [18] L. Chico, V.H. Crespi, L.X. Benedict, S.G. Louie, M.L. Cohen. *Phys. Rev. Lett.*, **76** (6), 971 (1996). DOI: 10.1103/PhysRevLett.76.971