DOI: 10.18411/vntr2025-177-1

УДК 691.175.5/.8

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОН

© Ольга Юрьевна Волкова, Николай Алексеевич Татусь
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
sklemina97@yandex.ru

Аннотация. *Настоящая статья посвящена современным методам определения характеристик волокон, применяемым как зарубежными, так и российскими исследователями. Волокна являются ключевым элементом в составе композитных материалов, и их характеристики напрямую влияют на прочностные и эксплуатационные свойства конструкций. Целью статьи является систематизация информации о существующих подходах и методах определения характеристик волокон, используемых в различных областях науки и техники.*
Ключевые слова: *волокна, композиты, механические свойства, методы испытаний, микроструктура, армирующие элементы, цифровой анализ.*

MODERN METHODS OF FIBER CHARACTERIZATION

Olga Volkova, Nikolay Tatus'
Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
sklemina97@yandex.ru

Abstract. *This article is devoted to modern methods of fiber characterization used by both foreign and Russian researchers. Fibers are a key element in the composition of composite materials, and their characteristics directly affect the strength and performance properties of structures. The purpose of this paper is to systematize information on existing approaches and methods of fiber characterization used in various fields of science and technology.*
Key words: *fibers, composites, mechanical properties, test methods, microstructure, reinforcing elements, numerical analysis.*

1. Введение. Волокна являются ключевыми структурными элементами в широком спектре современных высокотехнологичных композитов, поскольку именно они определяют основные механические и прочностные характеристики. Волокна могут быть как в виде непрерывных нитей (однонаправленных, тканых или трикотажных), так и в виде коротких или случайно ориентированных армирующих частиц. Правильная оценка их свойств — необходимое условие для надёжного проектирования и предсказуемого поведения композита.

Помимо технических применений, волокна играют ключевую роль и в области биоматериалов. Коллагеновые, шелковые и синтетические волокна применяются при создании имплантатов, шовных материалов, направленных матриксов для тканевой инженерии [1-3]. Здесь особенно важны как механические, прочностные, так и характеристики биосовместимости, которые зависят от морфологии, химического состава и структуры волокон.

Исследование свойств отдельных волокон и волоконных систем представляет собой сложную экспериментальную задачу. Это связано малым диаметром волокон, анизотропией, высокой чувствительностью к внешним воздействиям и часто — гетерогенной структурой волокон. За последние десятилетия был разработан широкий спектр методов, от традиционных механических испытаний до современных цифровых и спектроскопических подходов, позволяющих с высокой точностью анализировать структуру, состав и поведение волокон.

Цель данного обзора – проанализировать и классифицировать современные методы определения характеристик волокон, которые применяются для научных и прикладных исследований. Особое внимание уделяется:

- методам оценки механических и прочностных свойств (модуль упругости, прочность, деформация);
- микроскопическим и спектроскопическим методам анализа структуры и морфологии;
- методам неразрушающего контроля и цифровой обработки данных;
- сравнению отечественных и зарубежных подходов, включая примеры исследований последних лет.

Задачи статьи включают обзор методик для анализа волокон в составе композитов, а также сравнение различных подходов, применяемых российскими и зарубежными авторами.

2. Классификация характеристик волокон. Характеристики волокон можно условно разделить на несколько основных групп: механические, структурные, физико-химические и функциональные. Каждая из них имеет определяющее значение в зависимости от области применения — будь это конструкционные композиты, биоматериалы или технические текстили [1, 2].

2.1. Механические и прочностные характеристики для наиболее распространенных волокон приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип волокна	Модуль упругости (ГПа)	Прочность на растяжение (МПа)	Удлинение до разрыва (%)
Углеродное	230–600	3000–6000	1.0–2.0
Стеклянное	70–85	2000–3500	2.5–4.0
Арамидное (Kevlar)	60–130	2500–4000	2.5–4.0
Полимерное	2.5–4.0	500–1000	15–25
Коллагеновое	~0.5	50–100	>10

2.2. Структура волокна определяет его поведение на микро- и наноуровне, а также способность к взаимодействию с матрицей. К таким характеристикам относятся: диаметр, форма поперечного сечения, пористость, степень кристалличности, молекулярная ориентация, анизотропия и т.д. (табл. 2).

Таблица 2

Параметр	Типичная шкала измерения	Метод оценки
Диаметр волокна	1–50 мкм	SEM, оптическая микроскопия
Степень кристалличности	0–100 %	XRD, DSC, FTIR
Поверхностная шероховатость	нм–мкм	AFM, SEM
Молекулярная ориентация	Относительные величины	Raman-спектроскопия, XRD

2.3. Физико-химические характеристики определяют взаимодействие волокон с окружающей средой, устойчивость к старению, химическим веществам и температуре (табл.3):

Таблица 3

Характеристика	Описание	Метод оценки
Гидрофильность	Способность поглощать влагу	Измерение угла смачивания
Термическая стабильность	Пределы терморазложения	TGA, DSC
Биосовместимость	Реакция тканей на материал	Биотесты in vitro/in vivo

2.4. Функциональные характеристики волокон включают в себя электропроводность (углеродные, металлосодержащие волокна), пьезоэлектрические свойства, магнитная проницаемость, функционализация поверхности (антибактериальные покрытия).

3. Методы, применяемые зарубежными авторами для определения характеристик волокон. Разнообразие волокон – от синтетических до биополимерных – требует применения широкого спектра методов. Ключевыми направлениями в зарубежной практике являются механические испытания, микроскопические методы, спектроскопия, рентгеновские и термические исследования, а также комплексные подходы.

3.1. Механические испытания. Наиболее часто используемые методы включают растяжение одиночных волокон. Такие испытания регламентированы международными стандартами, в частности ASTM D3822 и ISO 11566. Применяются универсальные испытательные машины (например, Instron, Zwick/Roell) с возможностью работы на малых нагрузках, а также с применением микро-зажимов, эпоксидных креплений или клеевых площадок.

Исследование авторов [4] демонстрирует использование микромеханических стендов с цифровой видеорегистрацией деформации, что позволяет анализировать не только предел прочности и модуль упругости, но и процесс разрушения и микротрещинообразования.

3.2. Электронная и атомно-силовая микроскопия. Методы электронной микроскопии (SEM, TEM) используются для анализа морфологии волокон, включая поперечные сечения, распределение пор, структурные дефекты и особенности взаимодействия волокон с матрицей.

Атомно-силовая микроскопия (AFM) позволяет анализировать нанотопографию и локальные механические свойства поверхности волокна. В исследовании [5] AFM применялся для анализа биополимерных волокон, выявляя различия в структуре и адгезии на наноуровне.

3.3. Рентгеноструктурный анализ и спектроскопия. Рентгеноструктурный анализ (XRD) широко используется для определения степени кристалличности, ориентации макромолекул и фазовых переходов.

Раман-спектроскопия и FTIR [6] используются для оценки химического состава, выравнивания молекулярных цепей, наличия функциональных групп, степени сшивки и внутреннего напряжения.

3.4. Термический анализ. Дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC) и термогравиметрический анализ (TGA) позволяют определить температуры стеклования, плавления и разложения волокон. Эти методы активно применяются в работах по термостабильности армирующих волокон, особенно натуральных и биоразлагаемых.

3.5. Комплексные подходы. В последнее десятилетие наблюдается тренд на интеграцию методов. Например, авторы [7, 8] совмещают SEM, Raman-спектроскопию и цифровую корреляцию изображений (DIC) при изучении механики волокон в составе композитов. Такой мультиинструментальный подход позволяет получить больше информации о механических, химических и структурных свойствах исследуемого материала.

Сравнение методов, применяемых зарубежными авторами представлено в табл. 4.

Таблица 4

Метод	Применение	Комментарии
Single-Fiber Tensile Test	Механические свойства волокон (прочность, модуль)	Стандартный метод, применяется по ASTM D3822
Digital Image Correlation (DIC)	Анализ распределения деформаций	Оптический метод, дополняет механические испытания
SEM	Морфология поверхности, фрактография	Высокое разрешение, анализ разрушения
TEM	Наноструктура, кристалличность	Требует подготовки образцов, применяется к углеродным и керамическим волокнам
FTIR/Raman	Химический состав, ориентация молекул	Идентификация функциональных групп и структуры
TGA	Термическая стабильность	Анализ остаточной массы, температура разложения
DSC	Стеклование, плавление, кристаллизация	Применимо к полимерным волокнам
DMA	Температурная зависимость модулей	Используется для анализа демпфирования и переходов
Nanoindentation	Локальные механические свойства	Твердость, модуль в микромасштабе
XRD	Кристалличность и ориентация	Рентгеноструктурный анализ, применяется к полимерам и керамике

3.6. Цифровые методы анализа и машинное обучение. В последние годы активно развиваются методы 3D-томографии (microCT) и автоматической обработки изображений волокон [7]. С применением нейросетей стало возможно автоматизировать анализ морфологии и дефектов волокон. Такие методы повышают воспроизводимость и точность оценки.

4. Методы, применяемые российскими авторами для определения характеристик волокон. В отечественной научной и прикладной практике методы оценки характеристик волокон формировались на основе ГОСТов, ведомственных инструкций, а также адаптации зарубежных методик к существующей технической базе. Характерной чертой является высокая роль механических и термических методов при ограниченном использовании современных микроскопических и спектроскопических подходов, что связано с доступностью оборудования и инфраструктурой лабораторий.

4.1. Механические испытания. В российских исследованиях прочностные характеристики волокон (в том числе армирующих — стеклянных, углеродных, базальтовых и органических) оцениваются с использованием стандартов ГОСТ 1798-70 (испытание на растяжение), ГОСТ 6611.2-73, ГОСТ 57407-2017, а также методических указаний по испытанию армирующих элементов в составе композитов [9-13].

Испытания проводят на универсальных испытательных стендах. В последнее время также применяются цифровые тензометры и видеоконтроль деформации [14].

4.2. Микроскопические методы. Наиболее широко используется оптическая микроскопия для оценки поперечного сечения волокон, плотности упаковки и характера разрушения. Сканирующая электронная микроскопия (SEM) также применяется, например, при анализе льняных волокон.

Атомно-силовая микроскопия (AFM) и просвечивающая микроскопия (TEM) в России применяются ограниченно, а именно в институтах РАН, специализирующихся на наноматериалах.

4.3. Рентгено-структурный анализ. Методы рентгеноструктурного анализа (XRD) используются для оценки кристалличности, фазы и текстуры армирующих волокон. В работах [15] применялись стандартные установки типа ДРОН-3, ДРОН-7 для анализа структуры базальтовых и стеклянных волокон.

Однако ориентационный анализ молекулярных цепей, широко распространённый в зарубежных работах, в России проводится ограниченно из-за отсутствия соответствующих программных средств.

4.4. Спектроскопия. ИК-спектроскопия (FTIR) используется для анализа химической природы связующих и модифицированных волокон. Чаще всего применяется в исследованиях волокон растительного происхождения (льняные, пеньковые) [16].

Методы Раман-спектроскопии применяются редко, в основном в исследовательских институтах. Причиной является ограниченное распространение оборудования, требующего высокой точности настройки.

4.5. Термический анализ. Дифференциальная сканирующая калориметрия (DSC) и термогравиметрический анализ (TGA) активно применяются в российских лабораториях для оценки термостабильности и состава волокон. В работах [17] описано использование этих методов для анализа композитов на основе стеклянных волокон и полиэфирной матрицы [18].

В табл. 5 представлено сравнение методов, применяемых в российских исследованиях.

Таблица 5

Метод	Применение	Комментарии
Оптическая микроскопия	Измерение диаметра волокон, контроль однородности	Простой метод, применяется в большинстве лабораторий
Разрыв на микроразрывной машине	Оценка прочности и модуля	С использованием универсальных установок
Инфракрасная спектроскопия	Определение состава волокон	Используется ИК-Фурье спектроскопия
Микротвердость	Локальная твердость, устойчивость к вдавливанию	Применяется для керамических и стеклянных волокон
Термогравиметрический анализ	Температурная стабильность	Аналогично зарубежным исследованиям
Металлография	Анализ структуры, фазового состава	Особенно для волокон металлической природы
Рентгенофазовый анализ	Кристалличность, фаза	XRD методами в ИФХЭ, МИСиС и др.

5. Анализ зарубежных и отечественных подходов. Зарубежные работы чаще ориентированы на комплексность и интеграцию различных аналитических методов. Широко используются международные стандарты (ASTM, ISO), методы in-situ визуализации, автоматизированная обработка данных и моделирование. В российских исследованиях преобладают классические инженерные подходы, основанные на ГОСТах и других нормативных документах, что обеспечивает применимость в условиях промышленной практики в машиностроении и строительстве [9-13].

В табл. 6 представлен сравнительный анализ методов определения характеристик волокон.

Таблица 6

Метод	Зарубежные подходы	Российские подходы
Механические испытания	Растяжение одиночных волокон по ASTM D3822, ISO 11566; использование микро-зажимов, DIC, автоматических систем измерения	ГОСТ 11262, испытания на разрыв и изгиб, ручная фиксация волокон, стандартные испытательные машины
Электронная микроскопия (SEM)	Высокое разрешение, анализ разрушения и интерфейсов, соединение с EDS, автоматическая сегментация	SEM-анализ морфологии, без спектрального анализа или с ограниченным применением локального химического анализа
AFM и STM	Использование для анализа наноадгезии и поверхностных дефектов	Практически не применяется, ограничен доступ к оборудованию
Рентгеноструктурный анализ	Определение степени кристалличности, ориентации цепей, фазовых переходов; синхротронные исследования	XRD в стандартной конфигурации, ориентированы на крупные структуры; анализ ограничен разрешением

Спектроскопия (FTIR, Raman)	FTIR, Raman-спектроскопия для оценки молекулярной ориентации, функциональных групп, остаточного напряжения, иногда in-situ при нагрузке	FTIR в ИК-диапазоне для оценки состава, без in-situ подхода; Raman используется редко
Термический анализ (DSC, TGA)	Высокоточная DSC/TGA-анализ термостабильности волокон; часто используется в биокомпозитах и новых материалах	Применяются в основном при сертификации; точность ниже; ориентированы на определение диапазонов термической стабильности
Комплексные методы анализа	SEM + DIC + Raman + механика + моделирование; in-situ тесты на микромеханических стендах	Отдельное применение методов; отсутствие скоординированного анализа, комплексные исследования встречаются редко

В исследованиях зарубежных авторов совмещаются SEM, Raman-спектроскопия и DIC для комплексного анализа механических и структурных свойств волокон. Также распространено использование модифицированных испытательных установок и визуализации в реальном времени.

В России акцент делается на надежность и воспроизводимость результатов в рамках отечественных стандартов. Однако ограничения в техническом оснащении, доступе к высокоточному оборудованию сдерживают развитие более глубоких аналитических методик. Особое внимание следует уделить перспективам использования современных цифровых методов (например, цифровой корреляции изображений, анализа поверхностей и машинного обучения) в российских лабораториях, что позволит выйти на уровень международных исследований в области характеристик армирующих волокон.

6. Применение методов в анализе волокон композитов. В композитных материалах свойства волокон критически важны. Для оценки их качества до и после встраивания в матрицу применяются комплексные подходы: механические испытания, микроскопия, дифракционные и спектроскопические методы. Сложность анализа повышается из-за необходимости локализации волокон внутри материала, что требует неразрушающих технологий или прецизионной подготовки шлифов.

6.1. Применение результатов при расчетах прочности композитов. Характеристики армирующих волокон играют ключевую роль в определении механических свойств композитов, особенно в направлении волокон. Результаты испытаний волокон активно применяются в расчетах прочности и жёсткости композитов. Параметры, такие как модуль Юнга, предел прочности и коэффициент Пуассона, используются в микромеханических моделях, например, модели Халпина-Цая, правила смесей и конечно-элементное моделирование (FEM).

6.1.1. Микромеханические модели. Механические и прочностные характеристики волокон (модуль упругости, предел прочности, коэффициент Пуассона) используются в микромеханических моделях, таких как:

- Правило смесей (Rule of Mixtures, ROM) — определяет эффективный модуль упругости композита:

$$E_c = V_f E_f + V_m E_m,$$

где E_c – модуль композита, V_f, V_m – объемные доли волокон и матрицы, E_f, E_m – модули упругости компонентов.

- Модель Хирша, модель Halpin–Tsai — учитывают особенности распределения и ориентации волокон, взаимодействие между фазами.

Для таких моделей требуется точное знание характеристик волокон, включая параметры межфазного взаимодействия и степень выравнивания (ориентации) волокон, которые можно получить из SEM, XRD и Raman-спектроскопии.

6.1.2. Макромоделирование и конечно-элементный анализ (FEM). В инженерной практике используются методы конечных элементов (FEM), где волокна моделируются как ортотропные включения или анизотропные фазы с заданными свойствами:

- Вводятся упругие и прочностные характеристики армирующей фазы (например, из данных ASTM D3822).
- Строятся мезо- и макроуровневые модели для анализа напряжений, деформаций, повреждений.
- При использовании параметров из AFM и SEM можно учитывать начальные дефекты и микроструктуру.
- Платформы: ANSYS, ABAQUS, COMSOL Multiphysics.

6.1.3. Прогнозирование разрушения. Полученные параметры используются в:

- Критериях разрушения (критерий максимального напряжения, Hashin, Tsai-Wu).
- Моделях с учетом накопления повреждений волокна и отслоения от матрицы.
- Стохастических моделях с учетом распределения прочности по Вейбуллу.

7. Влияние морфологии и структуры волокон на свойства. Морфология и внутренняя структура армирующих волокон являются критическими факторами, определяющими их механические, физико-химические и адгезионные свойства, а, следовательно, и характеристики композитов в целом. На микро- и наноуровне волокна отличаются формой поперечного сечения, наличием пор и дефектов, степенью кристалличности, ориентацией макромолекул и поверхностной активностью.

7.1. Морфология волокон.

- Форма поперечного сечения волокон (круглая, овальная, треугольная, зубчатая) влияет на:
  - Площадь контакта с матрицей (более развитая форма повышает сцепление).
  - Распределение напряжений и склонность к разрушению.
- Поверхностная шероховатость увеличивает механическое сцепление с полимерной матрицей. Анализ методом AFM и SEM позволяет количественно оценить шероховатость.
- Пористость и внутренняя пустотелость уменьшают прочность, но могут улучшить звукопоглощение или теплоизоляцию (актуально для натуральных волокон).

7.2. Микроструктура: кристалличность и ориентация.

- Степень кристалличности прямо пропорциональна модулю упругости. Высококристаллические волокна демонстрируют большую жесткость, но меньшую пластичность.

- Ориентация макромолекул вдоль оси волокна обеспечивает его прочность на растяжение. Используются XRD и поляризационная микроскопия для анализа степени ориентации.

7.3. Структурные дефекты и неоднородности.

- Микротрещины, включения, неоднородности плотности становятся центрами зарождения трещин при нагрузке.
- Получение информации о дефектах возможно с помощью TEM, SEM и спектроскопических методов (Raman, FTIR).

7.4. Влияние морфологии на прочность композитов.

- Волокна с высокой кристалличностью и ориентацией хорошо сопротивляются деформации.
- Развитая морфология и шероховатость обеспечивают лучшее перераспределение напряжений на границе волокно–матрица.
- Дефекты и поры снижают прочность композита, особенно при ударных или циклических нагрузках.

На рис. 1 представлена диаграмма влияния степени кристалличности волокна на модуль упругости композита.

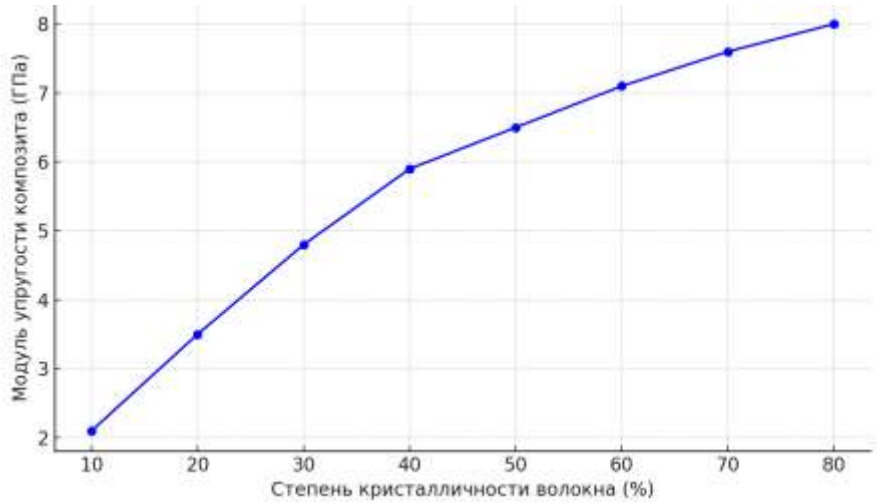


Рис. 1. Влияние кристалличности на модуль упругости композита.

Из графика на рис. 1 видно, что с ростом кристалличности за счет более упорядоченной структуры волокна увеличивается модуль упругости.

8. Перспективные и инновационные методы исследования. Современные подходы к исследованию волокон выходят за рамки классических методов и всё чаще включают мультидисциплинарные технологии — от наномеханики до машинного обучения. Одним из таких направлений является наноиндентация, применяемая для оценки локальных механических свойств поверхностей волокон, особенно биологических или модифицированных природных материалов.

Интеграция рентгеновской томографии высокого разрешения, в том числе in situ-синхротронных методов, позволяет отслеживать развитие микроповреждений в реальном времени, особенно при усталостных испытаниях композитов на основе базальтовых и углеродных волокон.

Не менее перспективной является комбинация ИК-спектроскопии (FTIR) и методов машинного обучения, что даёт возможность предсказывать механические характеристики волокон по их спектральному профилю с высокой точностью. Это направление особенно актуально при исследовании биоразлагаемых или модифицированных волокон, где химический состав влияет на поведение материала в условиях эксплуатации.
Цифровые двойники (digital twins), основанные на микроструктурных моделях, активно применяются при моделировании усталостного поведения и прогноза ресурса волокнистых армирующих элементов.
В рамках метода неразрушающего контроля значительную роль играет in situ Раман-спектроскопия, позволяющая отслеживать распределение напряжений вдоль волокна и внутри композита.
Инновационные подходы также включают сканирующую тепловую микроскопию (SThM), с помощью которой удаётся оценивать теплопроводность и термическую стабильность волокон на наноуровне, а также термографический мониторинг в реальном времени для оценки микроповреждений при циклической нагрузке.

9. Заключение. Волокна играют ключевую роль в структуре композитов. Чем точнее методы определение характеристик волокон, тем точнее определяются свойства изделий. Зарубежные подходы демонстрируют высокий уровень технической оснащенности и автоматизации, в то время как в России сохраняется акцент на механические испытания и микроскопию. Развитие цифровых методов и доступ к современному оборудованию позволят значительно расширить спектр доступных исследований в данной области.

Список литературы

1. Джатдоева Д.Т., Хубиева А.К., Болатова Р.Х. Разработка гибридных материалов на основе полипептидов и углеродных нанотрубок для биомедицинских применений // Вода: химия и экология. – 2024. – № 12. – С. 60-66.
2. Запороцкова И.В., Тимникова В.А., Попкова А.В. Исследование возможности создания композитов на основе биополимера, армированного углеродными нанотрубками, для использования их в протезировании // НБИ технологии. – 2023. – Т. 17, № 2. – С. 27-34. DOI 10.15688/NBIT.jvolsu.2023.2.4.
3. Матриксы для тканевой инженерии на основе модифицированных нановолокон поли-(3-гидроксибутирата), полученных методом электроформования / А. А. Ольхов, О. В. Староверова, В. В. Гурьев [и др.] // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). - 2016. - № 1. - С. 57-68.
4. Kumar R., Mikkelsen L.P., Lilholt H., Madsen B. Understanding the mechanical response of glass and carbon fibres: stress–strain analysis and modulus determination // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 942. Art. 012033. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012033.
5. Duān P., Xià Y., Bull S.J., Chén J. Finite element modeling of nanoindentation response of elastic fiber–matrix composites // J. Mater. Res. 2018. Vol. 33, No. 17. P. 2494–2503. DOI: 10.1557/jmr.2018.243.
6. Naito K., Nagai C. Raman scattering for tensile testing of PAN-based and pitch-based single carbon fibers // Fibers. 2024. Vol. 12, No. 10. – Art. 88. DOI: 10.3390/fib12100088.

7. Hülsbusch D., Mrzljak S., Walther F. In situ computed tomography for the characterization of fatigue damage development in glass fiber-reinforced polyurethane // J. Compos. Technol. Res. 2019. Vol. 61, No. 9.P. 821-828. DOI:10.3139/120.111389.
8. Divakarraju P.V., Pandurangan V., Nithyadharan M. Atomic force microscopy-based nanoindentation technique for characterizing the transverse and shear moduli of flax fibers // Composites Science and Technology. 2024. Vol. 258. Art. 110890. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110890.
9. ГОСТ Р. 56561-2015. Материалы текстильные. Определение состава. Идентификация волокон. – М.: Стандартинформ, 2016. – 58 с.
10. ГОСТ 6611.2-73. Нити текстильные. Методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 35 с.
11. ГОСТ 32794-2014. Композиты полимерные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2015. – 98 с.
12. ГОСТ 10727-2015. Нити стеклянные однонаправленные. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 6 с.
13. ГОСТ Р 57407- 2017. Волокна углеродные. Общие технические требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2017. – 12 с.
14. Соболев Ю.С. Критический обзор методов механических испытаний при растяжении // Светопрозрачные конструкции. – 2022. – № 1(139). – С. 56-61.
15. Завадский А.Е. Особенности рентгенографического анализа степени кристалличности полипропиленовых волокон // Изв. вузов. Химия и хим. технологии. - 2016. - Т. 59, Вып.7. - С. 80–85. DOI:10.6060/tcct.20165907.5337.
16. Елонова В.А. Установка для подготовки и проведения ик-спектроскопических исследований углеродных сорбентов // Развитие – 2018 : Научное электронное издание, Кемерово, 10–12 апреля 2018 года. – Кемерово: Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2018. – С. 79-90.
17. Гусева М.А., Петрова А.П. Методы испытаний и исследований термореактивных связующих для ПКМ // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 47-64. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.01.047_064.04.
18. Зарубин В.С., Сергеева Е.С., Магнитский И.В. Сравнительный анализ методов осреднения упругих характеристик композиционных материалов // Ключевые тренды в композитах: наука и технологии : сборник материалов Международной научно-практической конференции, Москва, 05–08 декабря 2018 года. – М.: ООО «Диона», 2019. – С. 266-271.

References

1. Dzhatdoeva D.T., Khubieva A.K., Bolatova R.Kh. Development of hybrid materials based on polypeptides and carbon nanotubes for biomedical applications // Water: Chemistry and Ecology. 2024. No.12. P. 60-66. (in Russian).
2. Zaporotskova I.V., Timnikova V.A., Popkova A.V. Investigation of the possibility of creating composites based on biopolymer reinforced with carbon nanotubes for their use in prosthetics // NBI technologies. 2023. Vol. 17, No. 2. P. 27-34. DOI: 10.15688/NBIT.jvolsu.2023.2.4.
3. Matrixes for tissue engineering based on modified poly-(3-hydroxybutyrate) nanofibers obtained by electroforming / A. A. Olkhov, O. V. Staroverova, V. V. Guryev [et al.] // Physics of Fibrous Materials: Structure, Properties, Science-intensive Technologies and Materials (SMARTEX). 2016. No. 1. P 57-68. (in Russian).

4. Kumar R., Mikkelsen L.P., Lilholt H., Madsen B. Understanding the mechanical response of glass and carbon fibres: stress–strain analysis and modulus determination // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. Vol. 942. Art. 012033. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899X/942/1/012033.
5. Duān P., Xià Y., Bull S.J., Chén J. Finite element modeling of nanoindentation response of elastic fiber–matrix composites // J. Mater. Res. 2018. Vol. 33, No. 17. P. 2494–2503. DOI: 10.1557/jmr.2018.243.
6. Naito K., Nagai C. Raman scattering for tensile testing of PAN-based and pitch-based single carbon fibers // Fibers. 2024. Vol. 12, No. 10. – Art. 88. DOI: 10.3390/fib12100088.
7. Hülsbusch D., Mrzljak S., Walther F. In situ computed tomography for the characterization of fatigue damage development in glass fiber reinforced polyurethane // J. Compos. Technol. Res. 2019. Vol. 61, No. 9.P. 821-828. DOI:10.3139/120.111389.
8. Divakarraju P.V., Pandurangan V., Nithyadharan M. Atomic force microscopy-based nanoindentation technique for characterizing the transverse and shear moduli of flax fibers // Composites Science and Technology. 2024. Vol. 258. Art. 110890. DOI: 10.1016/j.compscitech.2024.110890.
9. GOST R 56561-2015. Textile materials. Determination of composition. Identification of fibers. Moscow: Standartinform, 2016. 58 p. (in Russian)
10. GOST 6611.2-73. Textile threads. Methods of determination of breaking load and elongation at break. Moscow: Standards Publishing, 1997. 35 p. (in Russian)
11. GOST 32794-2014. Polymer composites. General technical conditions. Moscow: Standartinform, 2015. 98 p. (in Russian)
12. GOST 10727-2015. Unidirectional glass filaments. Technical conditions. Moscow: Standartinform, 2016. 6 p. (in Russian)
13. GOST R 57407-2017. Carbon fibers. General technical requirements and test methods. Moscow: Standartinform, 2017. 12 p. (in Russian).
14. Sobolev Yu.S. Critical review of methods of mechanical tensile tests // Translucent constructions. 2022. No. 1(139). P. 56–61. (in Russian).
15. Zavadskii A.E. Features of x-ray analysis of crystallinity degree of polypropylene fibres. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2016. Vol. 59, No. 7. P. 80-85. DOI:10.6060/tcct.20165907.5337. (in Russian).
16. Elonova V.A. Installation for preparing and conducting IR spectroscopic studies of carbon sorbents // Development - 2018 : Scientific electronic edition, Kemerovo, April 10-12, 2018. - Kemerovo: Kemerovo: FIC UUH SB RAS, 2018. - P. 79-90. (in Russian).
17. Guseva M.A., Petrova A.P. Methods of testing and research of thermosetting binders for PCM // Mechanics of composite materials and structures. 2021. Vol. 27, No. 1. P. 47-64. DOI: 10.33113/mkmk.ras.2021.27.01.047_064.04. (in Russian).
18. Zarubin V.S., Sergeeva E.S., Magnitsky I.V. Comparative analysis of methods of averaging elastic characteristics of composite materials // Key trends in composites: science and technology : proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, December 05-08, 2018. - M.: LLC “Diona”, 2019. - C. 266-271. (in Russian).

Дата поступления: 30 июня 2025 г.