



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Механические свойства экологически чистых гибридных полимерных композитов с джутовыми волокнами и волокнами сиды сердцелистной

Бхупендра Шарма^{1, а}, Риши Деванган^{2, b}, Шиама Шарма^{3, с, *}

¹ Университет Амита, Уттар-Прадеш, Нойда, 201313, Индия

² Университет Амита, Раджастан, Джайпур, 303002, Индия

³ Маннипалский университет, Джайпур, Джайпур, 303007, Индия

^а  <https://orcid.org/0000-0002-3207-7286>,  bpsharma@amity.edu; ^б  <https://orcid.org/0000-0002-1973-6726>,  rdewangan@jpr.amity.edu;

^с <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>,  shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 671.22

История статьи:

Поступила: 18 апреля 2024

Рецензирование: 11 июня 2024

Принята к печати: 12 июля 2024

Доступно онлайн: 15 сентября 2024

Ключевые слова:

Сиды сердцелистной

Семейство мальвовых

Композиты из натуральных волокон

Биоразлагаемые натуральные

волокна

Механические свойства

АННОТАЦИЯ

Введение. Признание лечебных свойств растений является неотъемлемой частью традиционных индийских систем здравоохранения. Среди прочих сиды сердцелистная, представитель семейства мальвовых, особенно известна в медицине своими выдающимися химическими свойствами. Это растение произрастает в субтропическом и тропическом климате Индии и символизирует глобальный переход к более экологически безопасным материалам. Учитывая растущие экологические проблемы, существует повышенный спрос на биоразлагаемые и возобновляемые ресурсы для промышленного применения, особенно для упрочнения полимерных матриц натуральными волокнами. **Целью данного исследования** является изучение эффективности волокон сиды сердцелистной в сочетании с джутом для упрочнения композитов на основе полимолочной кислоты (PLA). Это подчеркивает их потенциал для улучшения качества окружающей среды и повышения механических свойств материалов. **Материалы и метод.** Исследование включает в себя изготовление четырех различных композитных образцов: исключительно из 4-слойного джутового мата; необработанных волокон сиды сердцелистной в сочетании с 4-слойным джутовым матом; волокон сиды сердцелистной, обработанных бензоилированием, в сочетании с 4-слойным джутовым матом. Эти композиты были подвергнуты механическим испытаниям с упором на определение прочности на растяжение и прочности на изгиб. Был также проведен их микроструктурный анализ. **Результаты и обсуждение.** Результаты показывают, что волокна сиды сердцелистной, обработанные бензоилированием, демонстрируют значительно более высокую прочность по сравнению с их необработанными аналогами. При этом увеличение доли волокон сиды сердцелистной в композитах при сохранении постоянной общей массы коррелирует с повышением прочности материалов. Эти результаты показывают, что сиды сердцелистная и PLA-композиты, упрочненные джутовым волокном, могут стать конкурентной, экологически чистой альтернативой композитам, упрочненным синтетическим волокном, в различных отраслях промышленности. Наконец, обработанные натуральные волокна, такие как сиды сердцелистная, могут значительно улучшить механические свойства полимерных композитов, поддерживая их использование в качестве экологически чистых, высокоэффективных материалов в различных отраслях промышленности. Настоящее исследование способствует не только использованию натуральных волокон в коммерческих целях, но также достижению более высокой цели экологически рационального материаловедения.

Для цитирования: Шарма Б.П., Деванган Р., Шарма Ш.С. Механические свойства экологически чистых гибридных полимерных композитов с джутовыми волокнами и волокнами сиды сердцелистной // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2024. – Т. 26, № 3. – С. 267–285. – DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-267-285.

Введение

Натуральные композиты присущи самой природе, и наиболее ярким примером этого является древесина – композит из длинных целлюлозных волокон, скрепленных лигнином. Композицион-

ные материалы представляют собой соединение двух или более различных компонентов, которые сохраняют свои индивидуальные свойства без слияния или растворения. Это уникальное сочетание придает композиту особые характеристики, повышая его функциональность. На протяжении всей истории человечества композиционные материалы играли важную роль в различных областях. Еще в 1500 году до н. э. представители древних цивилизаций, такие как

*Адрес для переписки

Шарма Шиама С., д.т.н., доцент

Маннипалский университет, Джайпур,

303007, Джайпур, Индия

Тел.: +91-9887765320, e-mail: shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu

египтяне и жители Месопотамии, использовали смесь глины и соломы для строительства прочных конструкций, что свидетельствует о давней пользе композиционных материалов. Этот древний метод, который до сих пор применяется в кирпичных блоках, обеспечивает конструкциям впечатляющее сопротивление сжатию, разрыву и изгибу [1].

Спрос на композиционные материалы значительно вырос, что способствовало развитию производства полимеров, армированных волокнами (FRP). К 1945 году промышленность использовала более 7 млн фунтов стекловолокна для производства широкого ассортимента продукции, в основном для военных целей. После войны использование композитов быстро расширилось, особенно в 1950-х годах, когда новаторы начали внедрять их в такие области, как аэрокосмическая промышленность, строительство и транспорт. Высокая коррозионная стойкость стеклопластиковых композитов быстро завоевала признание, особенно в государственном секторе [2].

В настоящее время индустрия композиционных материалов постоянно развивается, особенно в секторе возобновляемых источников энергии. Инновации в области композиционных материалов имеют решающее значение для разработки лопастей ветряных турбин увеличенного размера. Инженеры могут разрабатывать композиционные материалы с учетом конкретных требований к производительности. Это включает в себя усиление композита в одном направлении путем выравнивания волокон для повышения прочности, при этом намеренно оставляют более слабые участки в менее критичных направлениях. Кроме того, выбор подходящих материалов матрицы позволяет инженерам адаптировать такие свойства, как стойкость к нагреву, химическим веществам и атмосферным воздействиям [3].

В последние годы наблюдается растущий интерес к использованию натуральных волокон как альтернативы синтетическим, что обусловлено осознанием необходимости охраны окружающей среды и настоятельной необходимостью экологически рационального развития. **Цель этой работы** – дать подробный обзор научных и технологических достижений, лежащих в основе композиционных материалов, а также технологий их производства и различных областей применения [1].

Экокомпозиты

Повышение осведомленности об экологических проблемах во всем мире привело к разработке пригодных для вторичной переработки, биоразлагаемых экономичных экоматериалов на основе экологически чистых составляющих. Указанная тенденция способствовала росту общества исследователей и дизайнеров, стремящихся снизить воздействие производства полимерных композитов на окружающую среду. Экокомпозиты – это особый тип композиционных материалов, в которых либо матрица, либо упрочняющая фаза, либо и то и другое производится из природных компонентов. Такие материалы изготавливаются путем сочетания растительных волокон с натуральными смолами, что представляет собой значительный шаг вперед в создании более экологичных и биоразлагаемых материалов. Эта разработка не только предлагает выход из растущего экологического кризиса, но и решает проблемы, связанные с утилизацией отходов и истощением ископаемых ресурсов [4]. Основными компонентами экологически чистых композиционных материалов являются матрица и упрочняющий компонент. В качестве матрицы могут быть использованы как биоразлагаемые материалы на нефтяной основе, например эпоксидные смолы, так и биоразлагаемые полимеры, например полимолочная кислота (PLA). Упрочняющий компонент, несущий нагрузку, является второй важной составляющей. Матрица и упрочняющий компонент совместно определяют общие характеристики композита. Эти композиты могут быть адаптированы к конкретным целям или требованиям, что позволяет создавать как частично, так и полностью биоразлагаемые композиты. Полностью биоразлагаемые композиты часто называют биополимерами или экологически чистыми полимерами. Однако и те композиционные материалы, которые поддаются лишь частичному биологическому разложению, также могут значительно снизить воздействие на окружающую среду по сравнению с традиционными материалами [2]. Исследователи активно изучают физические и механические свойства таких композитов, делая определенные допущения в определенных пределах, чтобы оценить их применимость. Ключевыми преимуществами экологически чистых композитов являются их

экономическая целесообразность, легкий вес и экологичность, что делает их привлекательной альтернативой в различных областях применения.

Упрочняющие компоненты в экологически чистых композиционных материалах

Упрочняющие компоненты играют ключевую роль в производстве экологически чистых композитов, выступая в качестве несущих элементов, улучшающих механические свойства полимерной системы. Эти материалы имеют решающее значение для повышения надежности, а также общей прочности и жесткости композиционных материалов. В экологически чистых композитах в качестве упрочняющего компонента могут быть использованы натуральные волокна, такие как джут, лен, рами и сизаль. Эти биоволокна встроены в полимерную матрицу и образуют дисперсную фазу, которая поглощает нагрузку и повышает механическую целостность композита [5]. Характеристики и структура волокон зависят от нескольких факторов, включая объемную долю волокон, их ориентацию, форму и сцепление с матрицей. Волокна в матрице могут быть как ткаными, так и неткаными, при этом тканые узоры обычно состоят из непрерывных перпендикулярных нитей. В зависимости от их расположения в матрице волокна классифицируются как однонаправленные или двунаправленные. В зависимости от типа используемого волокнистого упрочняющего компонента экокомпозиты могут быть также разделены на материалы с непрерывными упрочняющими волокнами в однонаправленной и двунаправленной формах и материалы с дисперсными упрочняющими волокнами [6].

Натуральные волокна бывают различных типов, включая лубяные волокна, волокна листьев, семян, плодов и стеблей. Понимание химического состава и поверхностного адгезионного сцепления этих волокон имеет значение для оптимизации эксплуатационных характеристик композитов, армированных натуральными волокнами. Ключевыми элементами этих волокон являются целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин, пектин, воски и водорастворимые вещества. Несмотря на свои преимущества, натуральные растительные волокна имеют ряд недостатков – например, высокое

влагопоглощение, что может привести к разбуханию волокон и изменению размеров конечного композитного материала. Кроме того, неправильная геометрия натуральных волокон создает проблемы при моделировании и прогнозировании поведения экологически чистых композитов. Эти факторы необходимо тщательно контролировать, чтобы в полной мере использовать потенциал натуральных волокон в экологически чистых композитах [7].

Матрицы в экологически чистых композиционных материалах

В экологически чистых композитах матрица играет важнейшую роль как однородная фаза, определяющая общие свойства композита. Она выступает в качестве конечного компонента в структуре композита, закрепляя упрочняющие волокна на месте, формируя структуру и равномерно распределяя нагрузку по всему композиту [8]. Механические характеристики экологически чистого композита в значительной степени зависят от свойств полимерной матрицы. Существует два основных типа матриц, используемых в экологически чистых композитах: термопласты и термореактопласты. Как правило, в состав термореактивных материалов входят фенолы и сложные полиэфиры, а в качестве термопластов обычно используются поливинилхлорид, полипропилен и полиэтилен. Применение этих материалов вместо традиционных обусловлено улучшением специфических свойств композитов [9]. Помимо того что матрица обеспечивает структуру, она также предотвращает истирание и появление новых дефектов поверхности. Матрица сохраняет расположение волокон, позволяя композиту деформироваться под нагрузкой, передавая и равномерно распределяя напряжение по волокнам. Выбор материалов матрицы может варьироваться от полученных из нефти бионеразлагаемых полимеров, таких как эпоксидные смолы, полиэтилен и полипропилен, до биополимеров – например, эпоксидных смол, полигидроксибутирата и PLA. Эти полимеры определяют эффективность и воздействие на окружающую среду экологически чистых композитов, в которых широко используются полиэтилен, полипропилен и полимолочная кислота [10].

Производство экологически чистых композиционных материалов

Производство экологически чистых композитов развивалось вместе с достижениями в области материаловедения. В настоящее время используются различные технологии, в том числе ручная укладка, вакуумное формование, литье под давлением, литьевое прессование полимера, пултрузия и формование прессованием. Каждый метод влияет на механические свойства композита, так как меняется целостность соединения волокон и морфология поверхности. Для изготовления терморезистивных матриц широко используется формование прессованием и ручная укладка, в то время как для термопластичных матриц – литье под давлением и винтовая экструзия. Выбранная технология изготовления существенно влияет на поведение материала, обеспечивая оптимизацию механических свойств без возникновения повреждений или трещин [11].

Ботаническое описание сиды сердцелистной

Сиды сердцелистная, относящаяся к семейству мальвовых и произрастающая в Индии, является растением, привлекающим внимание благодаря своей постоянной доступности в течение всего года. Это растение представляет собой однолетний или многолетний древесный полукустарник, который обычно достигает высоты 0,5...1,0 м. Листья очередные, слегка опушенные, светло-зеленые, овальные или удлинённые с зазубренными краями, размером 2,5...5,0 см,

как показано на рис. 1. Прилистники расположены линейно на черешках. Цветение и плодоношение обычно приходится на период с октября по февраль. Цветы обоеполые, от светло- или сернисто-желтого до кремово-белого цвета, расположены в пазухах и поодиночке, но плотно на кончиках ветвей. Растение образует вдавленные шаровидные дробные распадающиеся плоды диаметром 6...8 мм. На каждом плодolistике расположены две длинные прямые ости. Семена гладкие, приплюснутые, почковидной формы, их цвет варьируется от коричневого до черного [12].

Сиды сердцелистная, известная под разными названиями, такими как Audanika, Baladhya, Balini и *Sida cordifolia*, произрастает на высотах до 1800 м в тропических и субтропических регионах Индии, например в штатах Химачал-Прадеш (Himachal Pradesh), Карнатака (Karnataka), Махараштра (Maharashtra), Уттар-Прадеш (Uttar Pradesh), Ассам (Assam), Андхра-Прадеш (Andhra Pradesh), Гуджарат (Gujarat), Джамму и Кашмир (Jammu and Kashmir), Керала (Kerala), Мадхья-Прадеш (Madhya Pradesh), Тамилнаду (Tamil Nadu), Бенгалия (Bengal) и на побережье Коромандел (Coromandel). Недавний всплеск спроса на полимерные композиты в таких отраслях, как судостроение, аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение, строительство и спорт, выявил потенциал натуральных волокон, например сиды сердцелистной, в качестве альтернативы синтетическим волокнам. Несмотря на долговечность, легкий вес и высокую удельную прочность синтетических



Рис. 1. Растение сиды сердцелистная

Fig. 1. Sida cordifolia plant

волокон, к их недостаткам относятся высокая стоимость, неспособность к биоразложению и значительное поглощение энергии в процессе обработки, что может привести к загрязнению окружающей среды и износу технологического оборудования. Изучение натуральных волокон

является мероприятием по улучшению экологических характеристик материалов и изделий с целью обеспечения устойчивой альтернативы традиционным синтетическим материалам [13]. Физические свойства сиды сердцелистной приведены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Константы физических свойств сиды сердцелистной [13]

Constants of *Sida cordifolia* physical properties [13]

№ п/п	Константа	Корень (%)	Стебель (%)	Листья (%)
1	Зола общая	6,7	9,7	15,6
2	Зола, не растворимая в кислоте	2,7	2,4	7,6
3	Экстрактивные вещества, растворимые в спирте	2,8	2,9	4,5
4	Экстрактивные вещества, растворимые в воде	4,4	6,5	12

Настоящая работа объединяет важные результаты исследований натуральных волокон и композитов на их основе, подчеркивая их химические модификации, механические свойства и области применения. В статье рассматриваются некоторые химические модификации натуральных волокон в композитах – например, обработанных щелочью, силаном, уксусной кислотой и пр. Такая обработка улучшает адгезию поверхности волокна к полимерным матрицам, повышая механические свойства композита и снижая водопоглощение [14]. В исследовании изучаются вязкоупругие свойства полиэфирных композитов, армированных сизалевым волокном, изготовленных методом литьевого прессования полимера. Изменения адгезии волокна к матрице, вызванные различными видами обработки, были проанализированы с помощью СЭМ- и ИК-спектроскопии для оценки изменений морфологии поверхности волокна [15]. Представлены результаты исследования одноосной натуральной ткани *G. tilifolia*, в ходе которого с помощью СЭМ-анализа были выявлены примерно параллельные поверхности волокон [15]. Немногие авторы акцентируют внимание на лечебных свойствах сиды сердцелистной, используемой в аюрведической медицине благодаря своим обезболивающим, противовоспалительным и другим полезным свойствам [16]. Авторы подробно описывают характеристики

стеблевого волокна циссуса четырехугольного (*Cissus quadrangularis*), отмечая его механические свойства, превосходящие механические свойства других волокон [17]. В некоторых статьях подчеркивается потенциал кукурузных остатков (волокон кисточек) в качестве источника целлюлозы для различных применений, включая их экстракцию и определение характеристик [18]. В исследовании сравнивается предварительная обработка щелочью с другими технологиями получения натуральных волокон, отмечаются ее экологические преимущества и мягкие условия, несмотря на большую продолжительность [19].

Автор исследует волокно грудники ромболистной (*Sida rhombifolia*), подчеркивая высокое содержание в нем целлюлозы и его пригодность для применения в композиционных материалах [20]. Обсуждается также новое лигноцеллюлозное волокно, полученное из ситника развесистого (*Juncus effusus* L.), внимание акцентировано на его уникальной форме поперечного сечения [21]. Многие авторы сообщали о волокнах дихростахиса сизого (*Dichrostachys cinerea*), растительных волокнах гетеропогона скрученного (*Heteropogon contortus*) и стеблевых волокнах эпипремнума золотистого (*Epipremnum aureum*), при этом каждый из авторов подчеркивал потенциал этих волокон для создания легких композиционных материалов с низким удельным весом благодаря их благоприятным механическим

и термическим свойствам [22]. Предыдущие исследования были также посвящены свойствам растительных волокон *Perotis indica*, что позволило установить их пригодность в качестве замены традиционных материалов в различных отраслях промышленности благодаря их полезным механическим и термическим характеристикам [23]. Было охарактеризовано термическое разложение сиды сердцелистной (*Sida cordifolia* L.) и дана оценка ее потенциала в качестве источника энергии с помощью термогравиметрического анализа [24].

Каждое из этих исследований вносит свой вклад в непрерывную разработку композитов, армированных натуральными волокнами, позволяя получить представление об их потенциальном применении и улучшениях с помощью различных химических и физических обработок.

Материалы и метод

Процесс экстракции стеблевого волокна сиды сердцелистной

Растения сиды сердцелистной, обычно встречающиеся в тропических южных регионах Азии, были специально получены для этого исследования из округа Кришна в штате Андхра-

Прадеш. Эти растения обычно вырастают до высоты 1,5...2 футов и на момент отбора проб им было около двух лет. Процесс подготовки волокон начинался с обрезки стеблей до необходимой длины, за которой следовал 30-дневный период сушки под прямыми солнечными лучами для снижения содержания влаги. После сушки стебли подвергались 14-дневному процессу микробиологического разложения в пресной воде. После этого волокна извлекались из стеблей с помощью метода вымачивания. Наконец, эти волокна высушивались на солнечном свете для удаления остаточной влаги. Процесс экстракции волокон сиды сердцелистной проиллюстрирован на рис. 2.

Химическая обработка волокон

Щелочная обработка

Обработка натуральных волокон гидроксидом натрия (NaOH) является широко используемым методом модификации молекулярной структуры целлюлозных материалов. Значительное изменение, вызванное щелочной обработкой, связано с разрушением водородных связей в сетчатой структуре, что приводит к повышенной шероховатости поверхности. Этот процесс

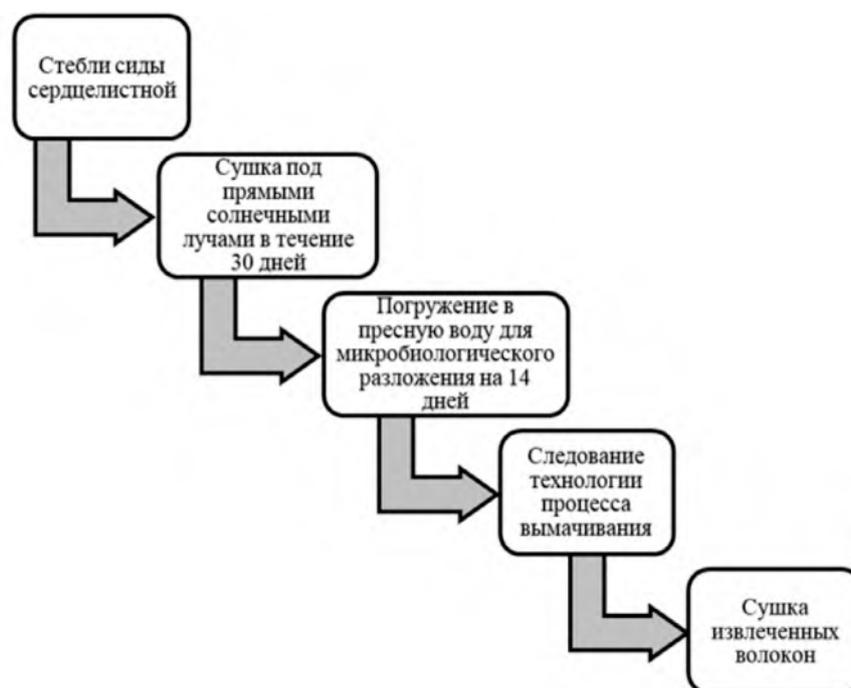
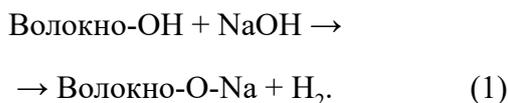


Рис. 2. Схема процесса экстракции волокон сиды сердцелистной
Fig. 2. Schematic flow for the extraction process of *Sida cordifolia* fibers

влечет за собой удаление определенных компонентов, таких как лигнин, воск и масла, которые покрывают внешнюю поверхность клеточной стенки волокна. Кроме того, это приводит к деполимеризации целлюлозы, обнажая кристаллиты меньшей длины [25]. Щелочная обработка оказывает два основных воздействия на волокна: во-первых, увеличивает шероховатость поверхности, способствуя усилению механического сцепления; во-вторых, увеличивает количество целлюлозы, находящейся на поверхности волокна. Протекает следующая реакция:

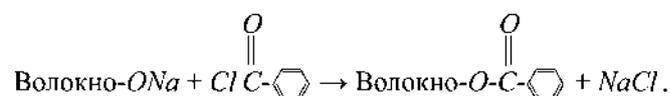


В процессе щелочной обработки 10%-й раствор наносили на 60 минут, как указано в табл. 2. После обработки раствором NaOH волокна тщательно промывали дистиллированной водой. После этого их помещали в печь при температуре 60 °С на 24 часа, чтобы облегчить удаление влаги.

Обработка бензоилированием

Обработка бензоилированием включает в себя использование бензоилхлорида для уменьшения гидрофильности волокна, улучшения адгезии к поверхности раздела фаз и последующего увеличения прочности композита.

Этот процесс также способствует повышению термической стабильности волокна [4]. При обработке бензоилированием сначала проводится предварительная обработка солью, что позволяет исключить такие экстрагируемые вещества, как лигнин, воски и масляные покрытия. На этом этапе на поверхности волокна появляется больше реакционноспособных гидроксильных (OH) групп. Впоследствии волокна подвергаются обработке бензоилхлоридом, при которой OH-группы волокон заменяются бензоильными группами, присоединенными к целлюлозной основе. Эта модификация повышает гидрофобность волокна и улучшает адгезию к матрице [26]:



Волокна сиды сердцелистной, предварительно обработанные щелочным раствором, подвергали обработке раствором NaOH и перемешиванию с бензоилхлоридом в течение 15 минут (табл. 3). Использовали растворы следующих концентраций: 10 % NaOH и 50 мл бензоилхлорида (1 % NaOH на 5 мл бензоилхлорида для обработки бензоилированием). Затем волокна тщательно промывали дистиллированной водой и погружали на 1 час в этанол для удаления избытка бензоилхлорида. После этого волокна подвергали еще одной тщательной промывке

Таблица 2

Table 2

Щелочная обработка: концентрация NaOH и продолжительность обработки
Alkaline treatment NaOH concentration and time duration

NaOH, %	Время, мин	Температура сушки в печи в течение 24 часов
10	60	60 °С

Таблица 3

Table 3

Бензоилирование: концентрация NaOH и продолжительность обработки
Benzylation treatment NaOH concentration and time duration

Выдержка в NaOH и суспензии хлористого бензоила, мин	Выдержка в этаноле, мин	Температура сушки в печи в течение 24 часов
15	60	80 °С

дистиллированной водой, а затем помещали в печь на 24 часа при температуре 80 °С, чтобы удалить остатки влаги из волокон.

Метод

Волокна сиды сердцелистной обладают рядом характеристик, которые делают их особенно подходящими для комбинации с джутовыми волокнами в композитных материалах. Волокна сиды сердцелистной известны своей хорошей прочностью на растяжение и гибкостью, в сочетании с джутовыми волокнами они могут улучшить общие механические свойства композита. Джутовые волокна сами по себе достаточно прочны, а сочетание с эластичностью и упругостью волокон сиды сердцелистной позволяет получить композит, обладающий одновременно и прочностью, и гибкостью. Химический состав волокон сиды сердцелистной, в состав которых входит значительное количество целлюлозы, вполне совместим с составом джутовых волокон. Такая совместимость может привести к лучшему сцеплению на границе раздела двух волокон при использовании в композитном материале, что способствует лучшему распределению нагрузки и повышает общую структурную целостность композитов [27].

Волокна сиды сердцелистной и джутовые волокна поддаются биологическому разложению и безвредны для окружающей среды. Это натуральные возобновляемые ресурсы, при обработке и утилизации которых образуется меньше отходов по сравнению с синтетическими волокнами, что благоприятно сказывается на окружающей среде. Совместное использование данных волокон в композитных материалах способствует достижению целей экологически рационального развития за счет снижения зависимости от невозобновляемых волокон на основе полимеров и снижения углеродного следа производимых материалов.

Джутовые волокна обладают относительно высокой степенью гигроскопичности, что способствует набуханию и последующему ухудшению механических свойств. Однако смешивание их с волокнами сиды сердцелистной, которые могут обладать другими свойствами по удержанию влаги, способно помочь смягчить эту проблему. Гибридный волокнистый композит может быть сконструирован таким образом, чтобы ис-

пользовать преимущества влагостойкости сиды сердцелистной и компенсировать гигроскопические недостатки джутовых волокон [28].

Оба волокна экономичны, особенно в регионах, где они произрастают в естественных условиях. Использование сиды сердцелистной в качестве гибридного материала с джутом позволяет снизить затраты на материалы, обеспечивая при этом высокую производительность, что делает гибридные композиты экономически выгодными для различных применений. Гибридный композит, изготовленный из волокон сиды сердцелистной и джута, может быть использован в различных областях применения, включая автомобилестроение, упаковку и строительные материалы. Комбинация может быть адаптирована для конкретных применений, требующих механических свойств или устойчивости к воздействию окружающей среды [29]. Эти синергетические свойства делают волокна сиды сердцелистной отличным кандидатом для комбинирования с джутовыми волокнами, что потенциально может привести к созданию прочных, устойчивых и пригодных для широкого спектра применений композитов. Поэтому в процессе изготовления волокна сиды сердцелистной смешиваются с упрочняющим материалом, т. е. джутовыми волокнами, а используемой в процессе матрицей служит PLA, которая является термопластичным полимером.

Расположение слоев полимерного композита

Гибридный композит из джута и PLA с увеличенной долей обработанных волокон сиды сердцелистной показан на рис. 3. Предварительно все композиционные материалы нагревали при температуре 800 °С в течение примерно четырех часов, затем эти материалы в указанном на рис. 3 порядке укладывали слоями в предварительно нагретую до 1700 °С форму. Форма герметизировалась сверху и снизу тефлоновыми листами для предотвращения прилипания композита к форме при приложении нагрузки. После упаковки формы к ней прикладывалась нагрузка, указанная в табл. 4.

После 15-минутного успешного приложения нагрузки к форме нагрев прекращался. Форма охлаждалась под давлением 150 кН в течение 120 минут. В результате проведения эксперимен-

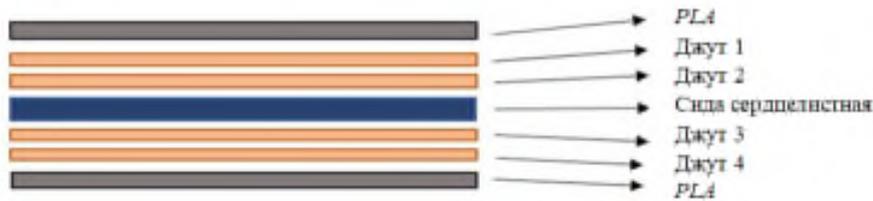


Рис. 3. Расположение слоев волокна

Fig. 3. Arrangement of fiber layers

Таблица 4

Table 4

Нагрузка на пресс-форму

Load applying on mould

№ п/п	Нагрузка, кН	Время, мин	Температура, °С
1	50	01	170
2	100	02	170
3	150	12	170

тов были получены четыре различных образца композитов:

образец 1: джут + PLA ;

образец 2: джут + необработанные волокна сиды сердцелистной + PLA;

образец 3: джут + обработанные волокна сиды сердцелистной + PLA;

образец 4: джут + обработанные волокна сиды сердцелистной + PLA.

В табл. 5 представлен весовой состав слоёв композитов.

Результаты и их обсуждение

Испытание на растяжение

Испытание на растяжение проведено с четырьмя образцами и тремя пробами каждого образца. В приведенных ниже таблицах описана степень разрушения, при которой рассчитывается пиковая нагрузка (кг) и предел прочности при растяжении (МПа). В табл. 6 указан средний предел прочности при растяжении образцов, изготовленных из гибридных композитов

Таблица 5

Table 5

Весовой состав слоев композита

Weight composition of the composite layers

Вес слоев, г	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
Слой 1	80	80	80	80
Слой 2	23,5	23,125	23,125	22,375
Слой 3	23,5	23,125	23,125	22,375
Слой 4	0	12	12	15
Слой 5	23,5	23,125	23,125	22,375
Слой 6	23,5	23,125	23,125	22,375
Слой 7	80	80	80	80
Общий вес	254	264,5	264,5	264,5

Механическая прочность на растяжение и изгиб
Mechanical strengths of tensile and flexural

Номер образца	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа
1	27,029	3,326
2	25,084	3,290
3	32,297	4,226
4	43,658	6,650

на основе сиды сердцелистной, упрочненных джутовыми волокнами. В качестве матрицы использовали биоразлагаемый полимер – полимолочную кислоту (PLA).

Испытание на изгиб

Испытание на трехточечный изгиб проведено с четырьмя образцами и тремя пробами каждого образца. В табл. 6 указано, в какой точке произошел изгиб, при котором была рассчитана максимальная нагрузка (кг) и предел прочности при изгибе (МПа). Предел прочности при изгибе был рассчитан по следующей формуле:

$$\sigma = \frac{3FL}{2wd^2}, \quad (2)$$

где F – максимальное приложенное усилие; L – длина образца; w – ширина образца; d – глубина образца.

В табл. 6 приведена средняя прочность на изгиб четырех образцов, изготовленных из композитов на основе сиды сердцелистной, упрочненных джутовыми волокнами; в качестве матрицы использован биоразлагаемый полимерный материал PLA.

Для оптимизации характеристик гибридного композита, изготовленного из волокон джута, PLA и сиды сердцелистной, необходимо тщательно учитывать несколько параметров.

1. Равномерное распределение температуры внутри композиционных материалов для снижения внутренних напряжений и предотвращения термического растрескивания во время формирования. Анализ влияния различных температур и продолжительности предварительного нагрева на вязкость PLA и целостность натуральных во-

локон может дать представление об оптимальных условиях обработки, которые минимизируют повреждение волокон и улучшают механические свойства композита. Для обеспечения хорошего смачивания и склеивания нужно добиться полного расплавления PLA и надлежащего обтекания волокон джута и сиды сердцелистной. Очень важно отрегулировать температуру формы, чтобы PLA равномерно растекалась, не разрушая натуральные волокна. Необходимо найти баланс, при котором температура будет достаточно высокой для текучести PLA, но достаточно низкой для предотвращения термической деструкции волокон джута и сиды сердцелистной.

2. Надлежащее сжатие композиционных материалов для уменьшения пустот и улучшения адгезии волокон к матрице. Приложенную нагрузку (как указано в табл. 4) необходимо оптимизировать в зависимости от толщины композита и расположения волокон. Увеличение нагрузки может помочь достичь лучшего уплотнения и однородности. Время выдержки под нагрузкой, особенно при высоких температурах, должно быть сведено к минимуму, чтобы предотвратить термическую деструкцию. Это позволит PLA-матрице затвердеть под давлением, что обеспечит хорошее механическое сцепление и адгезию между матрицей и волокнами. Скорость охлаждения и давление во время отверждения имеют решающее значение: слишком быстрое охлаждение способно вызвать остаточные напряжения, в то время как недостаточное давление может привести к расслаиванию или образованию пустот. Оптимизация этих параметров способствует повышению стабильности размеров и механических свойств композита.

3. Равномерное распределение волокон внутри матрицы и между слоями композита для обеспечения изотропных свойств. Важно регулировать вес и распределение каждого слоя (как показано в табл. 5) для оптимизации механических характеристик. Увеличение массы обработанных волокон сиды сердцелистной в последующих образцах позволяет предположить, что была разработана стратегия улучшения определенных механических свойств, таких как прочность на растяжение и изгиб. Улучшена адгезия между волокнами и PLA-матрицей для эффективной передачи напряжения.

Для визуального ознакомления с полученными результатами данные из таблицы графически представлены на рис. 4 и 5. На рис. 4 показаны пиковые нагрузки, полученные для различных проб четырех образцов:

- первый образец с четырьмя слоями джута весом 94 г и PLA-матрицей весом 160 г, использованный для изготовления композита, достиг предела прочности при растяжении 27,029 МПа;
- второй образец с четырьмя слоями джута весом 92,5 г, необработанными волокнами сиды сердцелистной весом 12 г и PLA-матрицей весом 160 г достиг предела прочности при растяжении 25,0844 МПа;
- третий образец с четырьмя слоями джута весом 92,5 г, обработанными волокнами сиды сердцелистной весом 12 г и PLA-матрицей весом 160 г достиг предела прочности при растяжении 32,297 МПа;
- четвертый образец с четырьмя слоями джута весом 89,5 г, обработанными волокнами сиды сердцелистной весом 15 г и PLA-матрицей весом 160 г достиг предела прочности при растяжении 43,658 МПа.

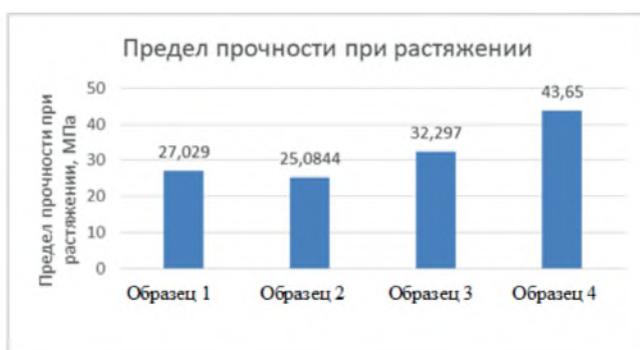


Рис. 4. График прочности при растяжении

Fig. 4. Tensile strength graph

Согласно полученным результатам вес волокон сиды сердцелистной увеличился при уменьшении веса джутового волокна, а при сохранении постоянной весовой доли прочность композита на разрыв увеличилась до оптимального значения. Образец с использованием необработанных волокон сиды сердцелистной демонстрирует низкую прочность на разрыв по сравнению с композитами на основе обработанных волокон стебля сиды сердцелистной.

На рис. 5 показаны пиковые нагрузки, полученные для различных проб из четырех образцов:

- первый образец с четырьмя слоями джута весом 94 г и PLA-матрицей весом 160 г, использованный для изготовления композита, достиг предела прочности при изгибе 3,326 МПа;
- второй образец с четырьмя слоями джута весом 92,5 г, необработанными волокнами сиды сердцелистной весом 12 г и PLA-матрицей весом 160 г достиг прочности при изгибе 3,290 МПа;
- третий образец с четырьмя слоями джута весом 92,5 г, обработанными волокнами сиды сердцелистной весом 12 г и PLA-матрицей весом 160 г достиг прочности при изгибе 4,226 МПа;
- четвертый образец с четырьмя слоями джута весом 89,5 г, обработанными волокнами сиды сердцелистной весом 15 г и PLA-матрицей весом 160 г достиг предела прочности при изгибе 6,650 МПа.

Согласно полученным результатам вес волокон сиды сердцелистной увеличился при уменьшении веса джутового волокна, а при сохранении постоянной весовой доли прочность композита на изгиб увеличилась до оптимального значения.



Рис. 5. График прочности при изгибе

Fig. 5. Flexural strength graph

Сканирующая электронная микроскопия

Упоминание гемицеллюлозы на поверхности необработанных волокон сиды сердцелистной не означает, что она была специально закреплена или нанесена на волокна. Скорее всего, гемицеллюлоза является естественным компонентом растительных волокон, включая волокна сиды сердцелистной. В данном контексте это утверждение означает, что слой гемицеллюлозы остался нетронутым и присутствовал на волокнах, поскольку они не подвергались обработке. При сборе и переработке растительных волокон они естественно содержат несколько биохимических компонентов, включая целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин. Эти компоненты влияют на физические и химические свойства волокон. Как правило, при переработке натуральных волокон для использования в композиционных материалах натуральные волокна сохраняют свой первоначальный биохимический состав, включая гемицеллюлозу. Гемицеллюлоза в таком состоянии может влиять на взаимодействие волокон с материалом матрицы (например, PLA), поскольку она может быть гидрофильной (притягивающей воду), что может препятствовать адгезии с гидрофобными (водоотталкивающими) материалами матрицы. Для удаления или модификации гемицеллюлозы и других компонентов часто используется щелочная обработка, отбеливание или бензоилирование. Такая обработка улучшает совместимость волокон с синтетическими полимерами за счет изменения химического состава их поверхности и снижения способности впитывать влагу.

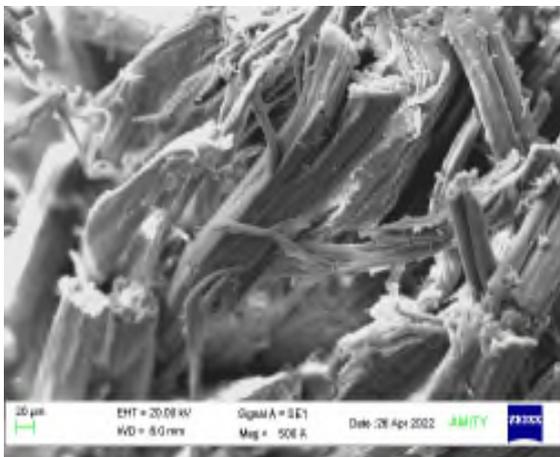


Рис. 6. Необработанные волокна (500×)

Fig. 6. Untreated fibers (500×)

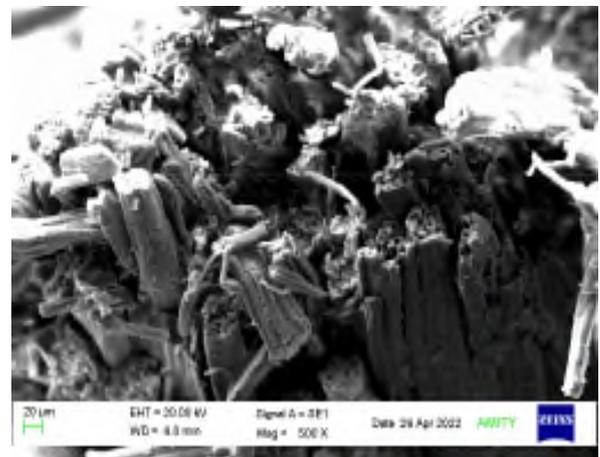


Рис. 7. Обработанные волокна

Fig. 7. Treated fibers

Для более детального визуального представления, чтобы проиллюстрировать наличие гемицеллюлозы или воздействие обработки на поверхности волокон, обычно используются методы микроскопической визуализации, например сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). Полученные изображения показывают морфологию поверхности волокон, подчеркивая различия между обработанными и необработанными волокнами. По этой причине морфология поверхности разработанного композита была проанализирована с помощью СЭМ.

Обработка поверхности волокон (как показано на рис. 6–9) может быть дополнительно оптимизирована. Такие методы, как обработка щелочью, силаном или уксусной кислотой, можно систематически варьировать и тестировать, чтобы найти наилучшие условия, повышающие смачиваемость и химическую связь на границе раздела фаз.

Улучшают свойства композита с помощью методов последующей обработки, например отжига или кондиционирования. Условия последующей обработки, такие как окружающая среда (влажность и температура), время и методы, могут быть адаптированы для снижения остаточных напряжений и повышения устойчивости композита к воздействию окружающей среды. Благодаря тщательному управлению этими параметрами и их контролю эксплуатационные характеристики гибридного композита могут быть доведены до максимума, что позволяет получить материал, который не только прочнее и долговечнее, но и в большей степени подходит для

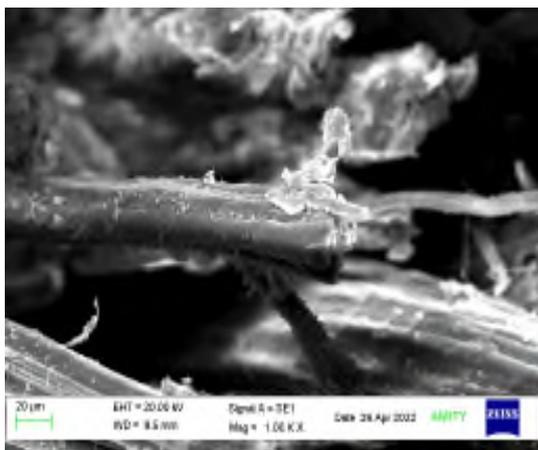


Рис. 8. Необработанные волокна (1,000×)

Fig. 8. Untreated fibers (1,000×)

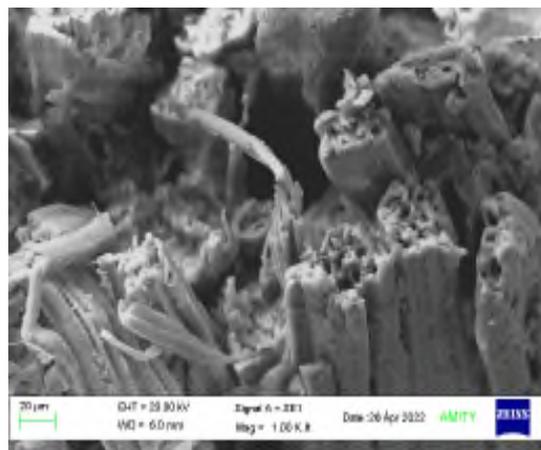


Рис. 9. Обработанные волокна

Fig. 9. Treated fibers

конкретных применений, где выгодно сочетать свойства натуральных и синтетических компонентов.

Образцы с трещинами при растяжении были отобраны для изучения механизмов разрушения и взаимодействия между матрицей и волокнами в композитах. СЭМ-анализ был проведен при 500-кратном и 1000-кратном увеличении, четыре образца были тщательно изучены при этих двух уровнях увеличения. На рис. 6 и 9 представлено сравнение СЭМ-изображений композитов, испытанных на растяжение, с волокнами сиды сердцелистной и без них, как необработанных, так и обработанных. При увеличении в 1000 крат было отмечено, что на поверхности необработанных волокон сиды сердцелистной сохранился слой гемицеллюлозы, который отсутствовал на волокнах, подвергнутых бензоилирующей обработке. Удаление слоя гемицеллюлозы повышает смачиваемость волокон, способствуя увеличению прочности на разрыв композитов, обработанных уксусной кислотой. Примечательно, что вытягивание волокон более выражено в образцах 3 и 4, содержащих обработанные бензоилированием волокна сиды сердцелистной по сравнению с необработанными вариантами. Это наблюдение подчеркивает повышенную прочность на разрыв композитов с обработанными волокнами, что объясняется более прочным соединением волокна с матрицей. Увеличенное вытягивание волокон отражает их повышенную несущую способность благодаря более высокой смачиваемости после обработки.

Заключение

Исследование, в котором использовались четыре различных состава 7-слойного полимерного композита, продемонстрировало значительное улучшение механических свойств при сохранении постоянной массовой доли волокнистого материала. Испытания, проведенные на прочность при растяжении, изгибе и с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), показали оптимальные значения, отражающие эффективность разработанного композита.

Целенаправленное увеличение веса волокон сиды сердцелистной в сочетании с уменьшением количества джутовых волокон при сохранении общего веса обоих волокон постоянным во всех образцах, содержащих обработанные бензоилированием волокна сиды сердцелистной в PLA-матрице, привело к значительному повышению прочности композита. Это говорит о том, что включение более высокой доли волокон сиды сердцелистной значительно повышает механическую прочность композита.

СЭМ-анализ образцов для испытаний на растяжение с трещинами при 500-кратном увеличении позволил получить ценную информацию о характеристиках сцепления волокон. Содержание лигнина, наблюдаемое в необработанных волокнах, коррелирует с более слабым сцеплением с матрицей. Наоборот, химически обработанные волокна сиды сердцелистной отличаются отсутствием лигнина в композите, что обеспечивает превосходное сцепление с матрицей и, как следствие, повышенную прочность. Повышенное вытягивание химически обработанных волокон

сиды сердцелистной еще раз подчеркивает их улучшенные характеристики несущей способности, обусловленные высокой смачиваемостью.

Основываясь на успешных результатах механических испытаний, рекомендуется изучить возможность гибридизации волокон сиды сердцелистной с другими натуральными волокнами для достижения еще более благоприятных результатов. Универсальность волокон сиды сердцелистной делает их пригодными для использования в сочетании с различными натуральными волокнами, что позволяет создавать специальные композитные материалы с превосходными механическими свойствами.

Экспериментальные результаты испытаний на растяжение и изгиб, проведенных на гибридных композитах, изготовленных из джута, полимолочной кислоты (PLA) и волокон сиды сердцелистной, демонстрируют важные результаты, касающиеся механических свойств этих материалов. Основные выводы из исследования можно резюмировать следующим образом.

Увеличение механической прочности обработанных волокон. Существует четкая тенденция, свидетельствующая о том, что механические свойства композитов улучшаются с добавлением и увеличением веса обработанных волокон сиды сердцелистной. Образец 4, содержащий наибольшее количество обработанных волокон сиды сердцелистной (15 г), демонстрирует как наивысшую прочность на растяжение – 43,658 МПа, так и наивысшую прочность на изгиб – 6,650 МПа. Это говорит о том, что процесс обработки повышает адгезию волокна к матрице, тем самым улучшая передачу нагрузки между волокнами и PLA-матрицей.

Влияние обработки волокон на свойства композита. Обработка волокон сиды сердцелистной играет решающую роль в эксплуатационных характеристиках композитов. Необработанные волокна в образце 2 привели к незначительному снижению прочности при растяжении и изгибе по сравнению с композитами, содержащими обработанные волокна. Это указывает на то, что процесс обработки может изменять поверхностные свойства волокон, улучшая совместимость и сцепление с PLA-матрицей.

В целом исследование показывает, что гибридные композиты, упрочненные обработанными волокнами сиды сердцелистной и джутом

в PLA-матрице, демонстрируют многообещающие механические свойства. Обработка натуральных волокон и их оптимизированное включение в композиты могут сыграть ключевую роль в разработке устойчивых и высокоэффективных материалов для различных инженерных применений. Для полной реализации потенциала таких композиционных материалов в промышленном применении необходимы дальнейшие исследования долговечности, воздействия на окружающую среду и экономической целесообразности.

Будущие сферы применения и потенциальные разработки

Исследование гибридных композитов, состоящих из волокон сиды сердцелистной, джута и PLA-матрицы, с особым упором на различные варианты обработки волокон продемонстрировало многообещающие результаты в повышении прочности при растяжении и изгибе. Однако для расширения сферы применения и повышения эксплуатационных характеристик этих композитов предлагаются дальнейшие исследования и разработки в следующих ключевых областях.

Усовершенствованные процессы химической или физической обработки волокон сиды сердцелистной могут еще больше улучшить их совместимость с PLA-матрицей, повысив механическое сцепление и общие эксплуатационные характеристики композита.

Модификация PLA-матрицы путем смешивания с другими биополимерами или добавления пластификаторов может улучшить ее пластичность и технологические характеристики, что позволит лучше сочетаться с натуральными волокнами.

Изучение альтернативных методов изготовления композитов, таких как литьевое прессование полимера или вакуумное формование, может обеспечить более однородные свойства материала и уменьшить содержание пустот. Применение циклов отверждения с переменным давлением и температурой может помочь оптимизировать механические свойства и свести к минимуму внутренние напряжения в композите. Можно также проанализировать различные последовательности укладки и ориентацию слоев волокон



на, чтобы адаптировать механические свойства к конкретным условиям применения.

Стоит оценить возможность применения этих композитов в конструкциях, таких как автомобильные компоненты, мебель, или даже в строительстве в качестве экологически чистой альтернативы традиционным материалам. Всесторонние исследования вариантов использования этих композитов с истекшим сроком службы, включая методы вторичной переработки и оценки способности к биологическому разложению, могли бы повысить их экологичность.

Благодаря решению этих задач исследования и разработки гибридных композитов с использованием джута, PLA и сиды сердцелистной могут быть значительно расширены, что приведет к инновационным применениям, которые позволят использовать их способность к биологическому разложению и механические свойства для экологически рационального развития.

Список литературы

1. *Ngo T.-D.* Introduction to composite materials // Composite and Nanocomposite Materials: From Knowledge to Industrial Applications. – London: IntechOpen, 2020. – DOI: 10.5772/intechopen.91285.
2. *Bajpai P.K., Singh I., Madaan J.* Development and characterization of PLA-based green composites: a review // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2014. – Vol. 27 (1). – P. 52–81. – DOI: 10.1177/0892705712439571.
3. Green composites: a review of processing technologies and recent applications / G.S. Mann, L.P. Singh, P. Kumar, S. Singh // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2020. – Vol. 33 (8). – P. 1145–1171. – DOI: 10.1177/0892705718816354.
4. *Li X., Tabil L.G., Panigrahi S.* Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review // Journal of Polymers and the Environment. – 2007. – Vol. 15. – P. 25–33. – DOI: 10.1007/s10924-006-0042-3.
5. *Bismarck A., Mishra S., Lampke T.* Plant fibers as reinforcement for green composites // Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. – CRC Press, 2005. – P. 52–128.
6. Natural fibre composites and their applications: a review / P. Peças, H. Carvalho, H. Salman, M. Leite // Journal of Composites Science. – 2018. – Vol. 2 (4). – DOI: 10.3390/jcs2040066.
7. Polymer composite materials: a comprehensive review / R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, A. Elharfi // Composite Structures. – 2021. – Vol. 262. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640.
8. Physicochemical properties of new cellulosic fibers from the bark of *Acacia arabica* / P. Senthamarai kannan, S.S. Saravanakumar, V.P. Arthanarieswaran, P. Sugumar // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. – 2016. – Vol. 21 (6). – P. 548–553. – DOI: 10.1080/1023666X.2016.1177699.
9. Effects of alkali treatment on the structure, morphology and thermal properties of native grass fibers as reinforcements for polymer matrix composites / W. Liu, A.K. Mohanty, L.T. Drzal, P. Askel, M. Misra // Journal of Materials Science. – 2004. – Vol. 39 (3). – P. 1051–1054.
10. Characterization of new natural cellulosic fiber from heteropogon contortus plant / N.R.J. Hyness, N.J. Vignesh, P. Senthamarai kannan, S.S. Saravanakumar, M.R. Sanjay // Journal of Natural Fibers. – 2018. – Vol. 15 (1). – P. 146–153. – DOI: 10.1080/15440478.2017.1321516.
11. On the microstructure and physical properties of untreated raffia textilis fiber / R.G. Elenga, G.F. Dirras, J. Goma Maniongui, P. Djemia, M.P. Biget // Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2009. – Vol. 40 (4). – P. 418–422. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.01.001.
12. Characterization of new natural cellulosic fiber from the bark of *dichrostachys cinerea* / P.G. Bakaran, M. Kathiresan, P. Senthamarai kannan, S.S. Saravanakumar // Journal of Natural Fibers. – 2018. – Vol. 15 (1). – P. 62–68. – DOI: 10.1080/15440478.2017.1304314.
13. Phyto-pharmacological properties of *Sida cordifolia*: a review of folklore use and pharmacological activities / N. Khurana, N. Sharma, S. Patil, A. Gajbhiye // Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research. – 2016. – Vol. 9 (suppl. 2). – P. 52–58. – DOI: 10.22159/ajpcr.2016.v9s2.13698.
14. Effect of chemical treatment on dynamic mechanical properties of sisal fiber-reinforced polyester composites fabricated by resin transfer molding / P.A. Sreekumar, R. Saiah, J.M. Saiter, N. Leblanc, K. Joseph, G. Unnikrishnan, S. Thomas // Composite Interfaces. – 2008. – Vol. 15 (2–3). – P. 263–279. – DOI: 10.1163/156855408783810858.
15. *Jayaramudu J., Guduri B.R., Varada Rajulu A.* Characterization of new natural cellulosic fabric *Grewia tilifolia* // Carbohydrate Polymers. – 2010. – Vol. 79 (4). – P. 847–851. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2009.10.046.
16. *Shakya A., Chatterjee S.S., Kumar V.* Efficacies of fumaric acid and its mono and di-methyl esters in rodent models for analgesics and anti-inflammatory agents // EC Pharmaceutical Science. – 2015. – Vol. 1 (2). – P. 76–88.
17. Extraction and characterization of natural cellulose fibers from maize tassel / C.E. Maepa,

- J. Jayaramudu, J.O. Okonkwo, S.S. Ray, E.R. Sadiku, J. Ramontja // *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. – 2015. – Vol. 20 (2). – P. 99–109. – DOI: 10.1080/1023666X.2014.961118.
18. *Indran S., Edwin Raj R., Sreenivasan V.S.* Characterization of new natural cellulosic fiber from *Cissus quadrangularis* root // *Carbohydrate Polymers*. – 2014. – Vol. 110. – P. 423–429. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.04.051.
19. *Sindhu R., Pandey A., Binod P.* Alkaline treatment // *Pretreatment of biomass: processes and technologies*. – Elsevier, 2015. – P. 51–60. – DOI: 10.1016/B978-0-12-800080-9.00004-9.
20. Characterization of new cellulosic fiber from the stem of *Sida rhombifolia* / R. Gopinath, K. Ganesan, S.S. Saravanakumar, R. Poopathi // *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. – 2016. – Vol. 21 (2). – P. 123–129. – DOI: 10.1080/1023666X.2016.1117712.
21. Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Juncus effusus* L. / M. Maache, A. Bezazi, S. Amroune, F. Scarpa, A. Dufresne // *Carbohydrate Polymers*. – 2017. – Vol. 171. – P. 163–172. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.04.096.
22. Characterization of natural cellulosic fiber from *Epipremnum aureum* stem / M.V. Maheshwaran, N.R.J. Hyness, P. Senthamaraiannan, S.S. Saravanakumar, M.R. Sanjay // *Journal of Natural Fibers*. – 2018. – Vol. 15 (6). – P. 789–798. – DOI: 10.1080/15440478.2017.1364205.
23. *Prithviraj M., Muralikannan R.* Investigation of optimal alkali-treated perotis indica plant fibers on physical, chemical, and morphological properties // *Journal of Natural Fibers*. – 2022. – Vol. 19 (7). – P. 2730–2743. – DOI: 10.1080/15440478.2020.1821291.
24. *Boubacar Laougé Z., Merdun H.* Pyrolysis and combustion kinetics of *Sida cordifolia* L. using thermogravimetric analysis // *Bioresource Technology*. – 2020. – Vol. 299. – DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122602.
25. Poly (lactic Acid): a versatile biobased polymer for the future with multifunctional properties-From monomer synthesis, polymerization techniques and molecular weight increase to PLA applications / E. Balla, V. Daniilidis, G. Karlioti, T. Kalamas, M. Stefanidou, N.D. Bikiaris, A. Vlachopoulos, I. Koumentakou, D.N. Bikiaris // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13 (11). – DOI: 10.3390/polym13111822.
26. Extraction of plant based natural fibers – a mini review / D. Mohankumar, V. Amarnath, V. Bhuvaneshwari, S.P. Saran, K. Saravanaraj, M. Srinivasa Gogul, S. Sridhar, G. Kathiresan, L. Rajeshkumar // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1145 (1). – P. 012023. – DOI: 10.1088/1757-899X/1145/1/012023.
27. *Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T.* Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview // *Composite Interfaces*. – 2001. – Vol. 8 (5). – P. 313–343. – DOI: 10.1163/156855401753255422.
28. *Nair K.C.M., Thomas S., Groeninckx G.* Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres // *Composites Science and Technology*. – 2001. – Vol. 61 (16). – P. 2519–2529. – DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00170-1.
29. *Joseph K., Thomas S., Pavithran C.* Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites // *Polymer*. – 1996. – Vol. 37 (23). – P. 5139–5149. DOI: 10.1016/0032-3861(96)00144-9.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 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



Characterizing the mechanical behavior of eco-friendly hybrid polymer composites with jute and *Sida cordifolia* fibers

Bhupendra Sharma^{1, a}, Rishi Dewangan^{2, b}, Shyam Sharma^{3, c, *}

¹ Department of Mechanical Engineering, Amity University Uttar Pradesh, Noida, 201313, India

² Department of Mechanical Engineering, Amity University Rajasthan, Jaipur, 303002, India

³ Department of Mechanical Engineering, Manipal University Jaipur, Jaipur, 303007, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-3207-7286>,  bpsharma@amity.edu; ^b  <https://orcid.org/0000-0002-1973-6726>,  rdewangan@jpr.amity.edu;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-1510-5871>,  shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 18 April 2024

Revised: 11 June 2024

Accepted: 12 July 2024

Available online: 15 September 2024

Keywords:

Sida cordifolia

Malvaceae family

Natural fiber composites

Biodegradable natural fibers

Mechanical characterization

ABSTRACT

Introduction. Recognition of the medicinal properties of plants is an integral part of traditional Indian health systems such as Unani, Siddha, Naturopathy and Ayurveda. Among others, *Sida cordifolia*, a member of the Malvaceae family, is especially celebrated in Ayurvedic medicine for its outstanding chemical properties. This plant grows in the subtropical and tropical climate of India and symbolizes the global shift towards more environmentally friendly materials. Given the rising environmental concerns, there is an increased demand for biodegradable and renewable resources for industrial applications, especially for reinforcing polymer matrices with natural fibers. **The purpose of this study** is to investigate the effectiveness of *Sida cordifolia* fibers combined with jute for reinforcing poly(lactic acid) (*PLA*) composites. This highlights its potential to improve both environmental quality and mechanical properties of materials. **Materials and method.** The study involved the fabrication of four different composite specimens: a solely 4-layered jute fiber mat, untreated *Sida cordifolia* fibers combined with a 4-layered jute mat, and *Sida cordifolia* fibers treated with benzylation combined with a 4-layered jute mat. These composites were subjected to mechanical testing focusing on tensile strength and flexural strength. Its microstructural analysis was also carried out. **Results and discussion.** The results show that benzylation-treated *Sida cordifolia* fibers exhibit significantly higher strength compared to its untreated counterparts. At the same time, an increase in the proportion of *Sida cordifolia* fibers in composites while maintaining a constant total mass correlates with an increase in the strength of the materials. These results indicate that *Sida cordifolia* and jute fiber-reinforced *PLA* composites can provide a competitive, environmentally friendly alternative to synthetic fiber-reinforced composites in a variety of industrial applications. In conclusion, treated natural fibers like *Sida cordifolia* can significantly improve the mechanical properties of polymer composites, supporting its use as environmentally friendly, high-performance materials in a variety of industries. This research not only promotes the use of natural fibers for commercial applications, but also contributes to the larger goal of sustainable materials science.

For citation: Sharma B.P., Dewangan R., Sharma S.S. Characterizing the mechanical behavior of eco-friendly hybrid polymer composites with jute and *Sida cordifolia* fibers. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2024, vol. 26, no. 3, pp. 267–285. DOI: 10.17212/1994-6309-2024-26.3-267-285. (In Russian).

References

1. Ngo T.-D. Introduction to composite materials. *Composite and Nanocomposite Materials: From Knowledge to Industrial Applications*. London, IntechOpen, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.91285.
2. Bajpai P.K., Singh I., Madaan J. Development and characterization of PLA-based green composites: a review. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2014, vol. 27 (1), pp. 52–81. DOI: 10.1177/0892705712439571.
3. Mann G.S., Singh L.P., Kumar P., Singh S. Green composites: A review of processing technologies and recent applications. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2020, vol. 33 (8), pp. 1145–1171. DOI: 10.1177/0892705718816354.

* Corresponding author

Sharma Shyam S., D.Sc. (Engineering), Assistant Professor

Manipal University Jaipur,

303007, Jaipur, India

Tel.: +91-9887765320, e-mail: shyamsunder.sharma@jaipur.manipal.edu

4. Li X., Tabil L.G., Panigrahi S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 2007, vol. 15, pp. 25–33. DOI: 10.1007/s10924-006-0042-3.
5. Bismarck A., Mishra S., Lampke T. Plant fibers as reinforcement for green composites. *Natural fibers, biopolymers, and biocomposites*. CRC Press, 2005, pp. 52–128.
6. Peças P., Carvalho H., Salman H., Leite M. Natural fibre composites and their applications: a review. *Journal of Composites Science*, 2018, vol. 2 (4). DOI: 10.3390/jcs2040066.
7. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., Elharfi A. Polymer composite materials: a comprehensive review. *Composite Structures*, 2021, vol. 262. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640.
8. Manimaran P., Saravanakumar S.S., Mithun N.K., Senthamaraikannan P. Physicochemical properties of new cellulosic fibers from the bark of *Acacia arabica*. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2016, vol. 21 (6), pp. 548–553. DOI: 10.1080/1023666X.2016.1177699.
9. Liu W., Mohanty A.K., Drzal L.T., Askel P., Misra M. Effects of alkali treatment on the structure, morphology and thermal properties of native grass fibers as reinforcements for polymer matrix composites. *Journal of Materials Science*, 2004, vol. 39 (3), pp. 1051–1054.
10. Hyness N.R.J., Vignesh N.J., Senthamaraikannan P., Saravanakumar S.S., Sanjay M.R. Characterization of new natural cellulosic fiber from heteropogon contortus plant. *Journal of Natural Fibers*, 2018, vol. 15 (1), pp. 146–153. DOI: 10.1080/15440478.2017.1321516.
11. Elenga R.G., Dirras G.F., Goma Maniongui J., Djemia P., Biget M.P. On the microstructure and physical properties of untreated raffia textilis fiber. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, vol. 40 (4), pp. 418–422. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.01.001.
12. Baskaran P.G., Kathiresan M., Senthamaraikannan P., Saravanakumar S.S. Characterization of new natural cellulosic fiber from the bark of *dichrostachys cinerea*. *Journal of Natural Fibers*, 2018, vol. 15 (1), pp. 62–68. DOI: 10.1080/15440478.2017.1304314.
13. Khurana N., Sharma N., Patil S., Gajbhiye A. Phyto-pharmacological properties of *Sida cordifolia*: a review of folklore use and pharmacological activities. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 2016, vol. 9 (suppl. 2), pp. 52–58. DOI: 10.22159/ajpcr.2016.v9s2.13698.
14. Sreekumar P.A., Saiah R., Saiter J.M., Leblanc N., Joseph K., Unnikrishnan G., Thomas S. Effect of chemical treatment on dynamic mechanical properties of sisal fiber-reinforced polyester composites fabricated by resin transfer molding. *Composite Interfaces*, 2008, vol. 15 (2–3), pp. 263–279. DOI: 10.1163/156855408783810858.
15. Jayaramudu J., Guduri B.R., Varada Rajulu A. Characterization of new natural cellulosic fabric *Grewia tilifolia*. *Carbohydrate Polymers*, 2010, vol. 79 (4), pp. 847–851. DOI: 10.1016/j.carbpol.2009.10.046.
16. Shakya A., Chatterjee S.S., Kumar V. Efficacies of fumaric acid and its mono and di-methyl esters in rodent models for analgesics and anti-inflammatory agents. *EC Pharmaceutical Science*, 2015, vol. 1 (2), pp. 76–88.
17. Maepa C.E., Jayaramudu J., Okonkwo J.O., Ray S.S., Sadiku E.R., Ramontja J. Extraction and characterization of natural cellulose fibers from maize tassel. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2015, vol. 20 (2), pp. 99–109. DOI: 10.1080/1023666X.2014.961118.
18. Indran S., Edwin Raj R., Sreenivasan V.S. Characterization of new natural cellulosic fiber from *Cissus quadrangularis* root. *Carbohydrate Polymers*, 2014, vol. 110, pp. 423–429. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.04.051.
19. Sindhu R., Pandey A., Binod P. Alkaline treatment. *Pretreatment of biomass: processes and technologies*. Elsevier, 2015, pp. 51–60. DOI: 10.1016/B978-0-12-800080-9.00004-9.
20. Gopinath R., Ganesan K., Saravanakumar S.S., Poopathi R. Characterization of new cellulosic fiber from the stem of *Sida rhombifolia*. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 2016, vol. 21 (2), pp. 123–129. DOI: 10.1080/1023666X.2016.1117712.
21. Maache M., Bezazi A., Amroune S., Scarpa F., Dufresne A. Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Juncus effusus* L. *Carbohydrate Polymers*, 2017, vol. 171, pp. 163–172. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.04.096.
22. Maheshwaran M.V., Hyness N.R.J., Senthamaraikannan P., Saravanakumar S.S., Sanjay M.R. Characterization of natural cellulosic fiber from *Epipremnum aureum* stem. *Journal of Natural Fibers*, 2018, vol. 15 (6), pp. 789–798. DOI: 10.1080/15440478.2017.1364205.
23. Prithviraj M., Muralikannan R. Investigation of optimal alkali-treated perotis indica plant fibers on physical, chemical, and morphological properties. *Journal of Natural Fibers*, 2022, vol. 19 (7), pp. 2730–2743. DOI: 10.1080/15440478.2020.1821291.
24. Boubacar Laougé Z., Merdun H. Pyrolysis and combustion kinetics of *Sida cordifolia* L. using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 299. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122602.



25. Balla E., Daniilidis V., Karlioti G., Kalamas T., Stefanidou M., Bikiaris N.D., Vlachopoulos A., Koumentakou I., Bikiaris D.N. Poly (lactic Acid): a versatile biobased polymer for the future with multifunctional properties-From monomer synthesis, polymerization techniques and molecular weight increase to PLA applications. *Polymers*, 2021, vol. 13 (11). DOI: 10.3390/polym13111822.

26. Mohankumar D., Amarnath V., Bhuvaneshwari V., Saran S.P., Saravanaraj K., Srinivasa Gogul M., Sridhar S., Kathiresan G., Rajeshkumar L. Extraction of plant based natural fibers – a mini review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1145 (1), p. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/1145/1/012023.

27. Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview. *Composite Interfaces*, 2001, vol. 8 (5), pp. 313–343. DOI: 10.1163/156855401753255422.

28. Nair K.C.M., Thomas S., Groeninckx G. Thermal and dynamic mechanical analysis of polystyrene composites reinforced with short sisal fibres. *Composites Science and Technology*, 2001, vol. 61 (16), pp. 2519–2529. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00170-1.

29. Joseph K., Thomas S., Pavithran C. Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites. *Polymer*, 1996, vol. 37 (23), pp. 5139–5149. DOI: 10.1016/0032-3861(96)00144-9.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 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>).