



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

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



Анализ механических свойств и характеристик свободных колебаний полимерного композита на основе переплетенных обработанных волокон джута

Савендра Сингх ^{a, *}, Четан Хирвани ^b

Национальный технологический институт Патны, Патна, Бихар, 800005, Индия

^a <https://orcid.org/0000-0002-5151-0284>, savendrasingh123@gmail.com, ^b <https://orcid.org/0000-0003-4291-4575>, chetank.me@nitp.ac.in

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 678

История статьи:

Поступила: 20 июня 2023
Рецензирование: 30 июня 2023
Принята к печати: 10 июля 2023
Доступно онлайн: 15 сентября 2023

Ключевые слова:

Натуральное волокно
ИКФС
Поверхностная обработка
Собственная частота
Затухание колебаний
Свободная вибрация
СЭМ (РЭМ)

Благодарности

Авторы очень благодарны руководству Инженерного колледжа Райкия (Азамгарх) за предоставленную лабораторию для проведения исследовательской работы.

АННОТАЦИЯ

Введение. В последнее время существенно увеличилось использование натуральных волокон – они эффективно заменяют синтетические, что благотворно влияет на окружающую среду, так как упрощается процесс утилизации отходов. Однако по механическим свойствам натуральные волокна уступают синтетическим. **Цель работы.** В этом исследовании рассматривалось влияние обработки поверхностных и более глубоких слоев джутового волокна на механические характеристики и характеристики свободных колебаний композиционного материала на его основе. **Методы исследования.** Благодаря равномерному распределению напряжений в направлениях основы и утка в настоящем исследовании были использованы четырехслойные джутовые волокна корзиночного плетения. **Результат и обсуждение.** Механические свойства и характеристики свободных колебаний композиционных материалов значительно улучшаются, если джутовые волокна предварительно обработать NaOH, поскольку он устраняет слабый компонент матрицы – лингин – и делает волокна более жесткими и прочными. Однако увеличение процентного содержания NaOH и времени выдержки волокон в растворе NaOH мало влияет на эти свойства. Наибольшие значения временного сопротивления и модуля упругости при растяжении составляют $50 \pm 1,17$ МПа и $1,94 \pm 0,23$ ГПа соответственно и характерны для композита на основе джутового волокна корзиночного плетения, обработанного в течение 1 часа. Такая обработка позволяет повысить временное сопротивление и модуль упругости примерно на 12 и 40 % соответственно. Точно так же значения сопротивления разрушению и модуля упругости при изгибе составляют $95 \pm 1,17$ МПа и $3,99 \pm 0,23$ ГПа соответственно и характерны для композита на основе джутового волокна корзиночного плетения, обработанного в течение 1 часа. Полученный таким способом композиционный материал демонстрирует самое высокое значение основной частоты: 77,837 Гц. Наличие связи О-Н в композиционном материале, как показало исследование ИКФС (инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье), придает ему гидрофильный характер и ограничивает использование во влажной среде. Соотношения волокна и матрицы видны на изображениях СЭМ (РЭМ).

Для цитирования: Сингх С.П., Хирвани Ч.К. Анализ механических свойств и характеристик свободных колебаний полимерного композита на основе переплетенных обработанных волокон джута // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 137–151. – DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-137-151.

Введение

Композиционные материалы на основе натуральных волокон являются хорошей альтернативой композиционным материалам на основе синтетических волокон и находят применение в различных областях, где действуют низкие и средние нагрузки, благодаря их малому весу, низкой стоимости, высокому соотношению

прочности и веса, биоразлагаемости, высокой доступности и другим показателям. Это связано с растущим спросом на материалы с особыми требованиями к свойствам и не загрязняющие окружающую среду. Натуральные волокна обладают лучшими механическими свойствами и характеристиками свободных колебаний в плетеном состоянии. Их свойства улучшаются по мере увеличения количества слоев [1, 2]. В результате армирования динамические механические характеристики композиционных материалов повышаются. Наличие целлюлозы и гемицеллюлозы в ячейках волокна улучшает

*Адрес для переписки

Сингх Савендра Пратап,
Национальный технологический институт Патны
Патна, Бихар, 800005, Индия
Тел.: +91-9455446960, e-mail: savendrasingh123@gmail.com

тепловые характеристики плетеного композита из натуральных волокон [3]. На характеристики коробления плетеного композита из натуральных волокон влияет тип плетения, и они ухудшаются по мере увеличения количества армирующих слоев. Армирование стекловолокном улучшает характеристики композиционных материалов [4]. На механические свойства плетеных композиционных материалов из натуральных волокон также влияет ориентация волокон [5]. М. Мейри (M. Mejr) исследовал использование композиционных материалов из натуральных волокон в производстве зубчатых колес [6–7].

Свойства композиционного материала улучшаются по мере увеличения толщины, что требует новых методов обработки [8–10]. Тидарут Джираваттанасомкул (Tidarut Jirawattanasomkul) и его коллеги изучили применение натурального волокна в бетоне. Натуральные волокна могут использоваться для поглощения звука, поскольку они обладают хорошей акустикой [11]. Нанонаполнители, такие как углеродные нанотрубки, нано-SiO₂, нано-глина и другие, добавлялись в композит для улучшения его качеств без увеличения его плотности [12]. С. Шри Картикеян (S. Sri Karthikeyan) и его коллеги исследовали использование композита из натуральных волокон в качестве замены асбестовых волокон, пыль от которых оказывает опасное воздействие [13]. Способность натуральных волокон впитывать воду разрушает их. Синтетические волокна могут быть добавлены в композиты из натуральных волокон для дальнейшего улучшения их качества [14, 15]. Функциональная группа, входящая в состав композита, выявляется с помощью ИКФС-анализа [16, 17]. Исследование морфологии поверхности было проведено Ядвиндером Сингхом (Yadvinder Singh) с коллегами, которые пришли к выводу, что волокна, обработанные щелочью, обладают лучшими свойствами по сравнению с необработанными волокнами.

Обзор литературы показывает, что добавление натурального волокна к полимерной матрице (как в виде частиц, коротких и случайных, длинных волокон, так и в плетеной форме) улучшает механические свойства композита, при этом плетеная форма оказывает наиболее положительное влияние на механические свойства [18]. Натуральные волокна снижают горючесть композиционных материалов, а по сравнению

с полиэфирной матрицей матрица из полимолочной кислоты демонстрирует более высокие механические свойства при армировании банановыми и сизалевыми волокнами [19]. Результаты испытаний композитов на основе волокон сизаля и алоэ вера на расслаивание показали, что композит из волокон сизаля расслаивается в меньшей степени и полученные поверхности характеризуются меньшей шероховатостью [20]. Помимо улучшения до определенной степени характеристик композита, добавление волокон также увеличивает процент пустот и водопоглощение в композите [21]. На механические свойства композита из натурального волокна влияет тип плетения и степень водопоглощения [22, 23]. Поскольку добавление нанонаполнителей способствует адгезии между волокном и матрицей и увеличивает межфазный контакт, то заполнение пустот композита наноматериалами улучшает механические свойства и снижает водопоглощение [24]. Комбинирование улучшает характеристики композиционных материалов, а также порядок укладки и обработки поверхности [25, 26]. На характеристики композита влияет количество добавленных слоев, эффект комбинирования, создаваемый между слоями синтетическими волокнами, такими как стекло [27, 28].

Несмотря на то что некоторые исследователи провели обширные исследования различных композитов из натуральных волокон и комбинированных полимерных композитов, ни одно из этих исследований не было признано относящимся к плетеным композитам на основе обработанных натуральных волокон из-за проблем с плетением. Согласно различным академическим источникам, обработанные натуральные волокна обладают лучшими свойствами, чем необработанные. **Цель настоящего исследования** состоит в том, чтобы подготовить слоистые композиционные материалы, изготовленные из плетеных натуральных волокон и полимеров, и изучить, как обработка поверхности влияет на механические свойства и характеристики свободных колебаний, а также изучить механическое поведение плетеных полимерных композитов и характер свободных колебаний после выдержки в растворе NaOH. Спектр ИКФС был извлечен для анализа функциональной группы в джутовом волокне.

Материалы и методы исследования

Материалы

В качестве армирующего материала в исследовании использовались джутовые волокна, которые были сотканы. Джутовая ткань, когда-то бывшая рыхлой, превратилась в пряжу. В каждой нити имеется от 80 до 120 свободных нитей. Затем, как видно на рис. 1, эти нити были сплетены в конструкцию, напоминающую корзину. Плетеные маты для этого исследования были закуплены у компании Kiran Jute Industry в Каль-

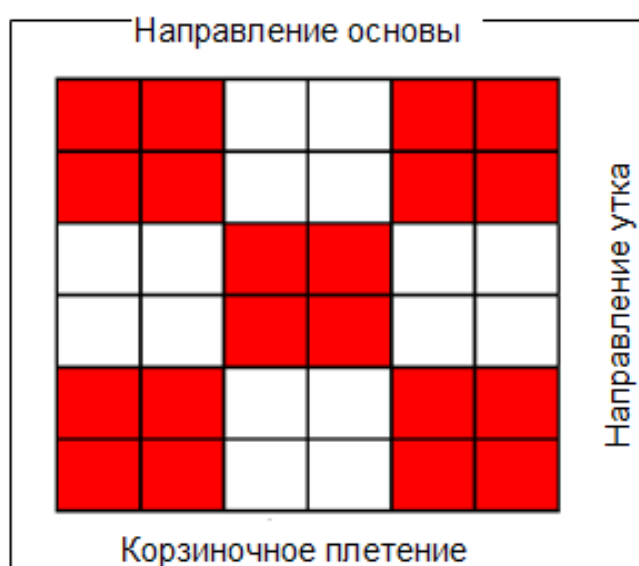


Рис. 1. Корзиночное плетение джутовых волокон

Fig. 1. Basket weave jute fibers

кутте, Западная Бенгалия, Индия. Эпоксидная смола с отвердителем HV953 в соотношении 1:1 использовалась в качестве матричного материала. Компоненты были закуплены у индийской компании Vasavibala Resins Ltd., Ченнаи.

Метод изготовления

Слоистые композиционные материалы изготавливаются с использованием компрессионной формовочной машины. В форму из нержавеющей стали размерами 260×260×4 мм предварительно заливали достаточное количество смолы. Затем внутрь смолы помещали мат корзиночного плетения и с помощью валика смолу распределяли по мату. Процесс повторяли до тех пор, пока не был получен четырехслойный мат, прежде чем заполнить полость рассчитанным количеством смолы. Затем на пресс-формовочной машине прессовали форму, выдерживая ее в течение 1 часа при температуре 80 °C и давлении 150 кгс/см². Полученные слоистые композиционные материалы разрезали для приготовления образцов в соответствии со спецификациями ASTM. На рис. 2 и 3 соответственно показана подготовка композита и установка машины для компрессионного формования.

Согласно стандарту ASTM D-638 испытание на растяжение проводили при скорости испытания 2 мм в минуту. Образец в форме собачьей кости имел следующие размеры: длина 165 мм, калибровочная длина 57 мм и ширина 13 мм. Испытания на изгиб по трехточечной схеме про-

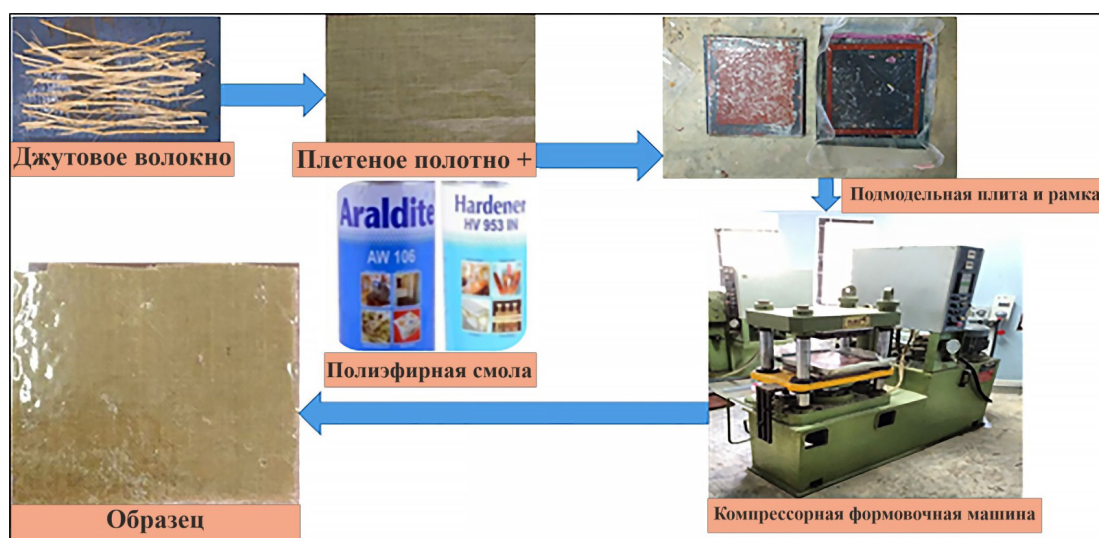


Рис. 2. Схема получения композита

Fig. 2. Composite preparation flow diagram

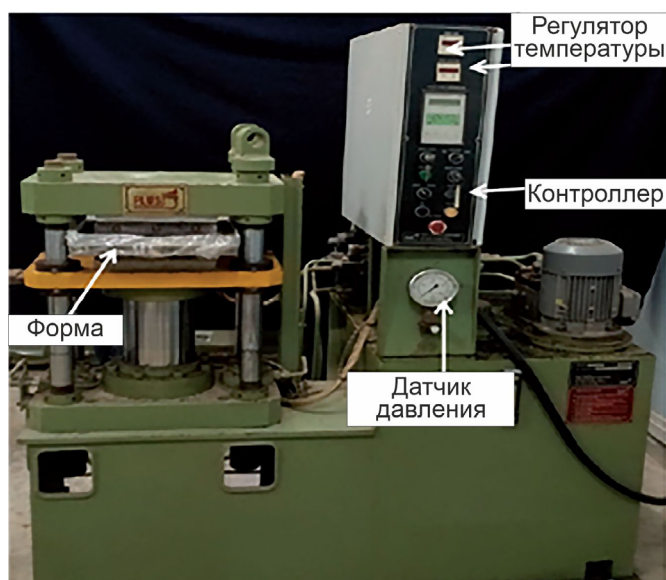


Рис. 3. Экспериментальная установка

Fig. 3. Experimental setup

водили в соответствии со стандартом ASTM D-790 при скорости испытания 1,7 мм в минуту с точностью определения положения 0,001 мм и точностью скорости 0,005 %. Образец изготавливали со стандартными размерами: 127 мм в длину, 12,7 мм в ширину и 4 мм в толщину. При проведении ударного испытания на композитном образце размерами 63,7×12,7×3 мм следовали рекомендациям ASTM D-256 с точностью по углу 0,1°.

Анализ свободных колебаний позволил исследователям лучше понять динамическое поведение композиционных материалов. С использованием экспериментального модального анализа была обнаружена собственная частота и связанный с ней коэффициент затухания композита. Экспериментальный модальный анализ выполнялся с использованием теста ударным молотком, как схематически показано на рис. 4. Для этого анализа были приняты во внимание первые три режима изгиба композита, изготовленного из джутового волокна корзиночного плетения. Исследование свободных колебаний проводилось при свободных граничных условиях. Образец размером 170×17×3 мм был закреплен на жесткой концевой опоре, такой как консольная балка, и с помощью воска над образцом был установлен легкий акселерометр весом 4 г для получения первых трех собственных частот композита на основе плетеного джутового волокна. Использование легкого акселерометра помогло избежать дополнительного воздействия на массу тканого композита. После удара сигнал отправлялся в 8-канальную систему сбора данных DEWE для использования алгоритма быстрого преобразования Фурье (алгоритма БПФ) с целью преобразования сигнала во временной области в частотную форму. Непосредственные измерения соответствующих значений

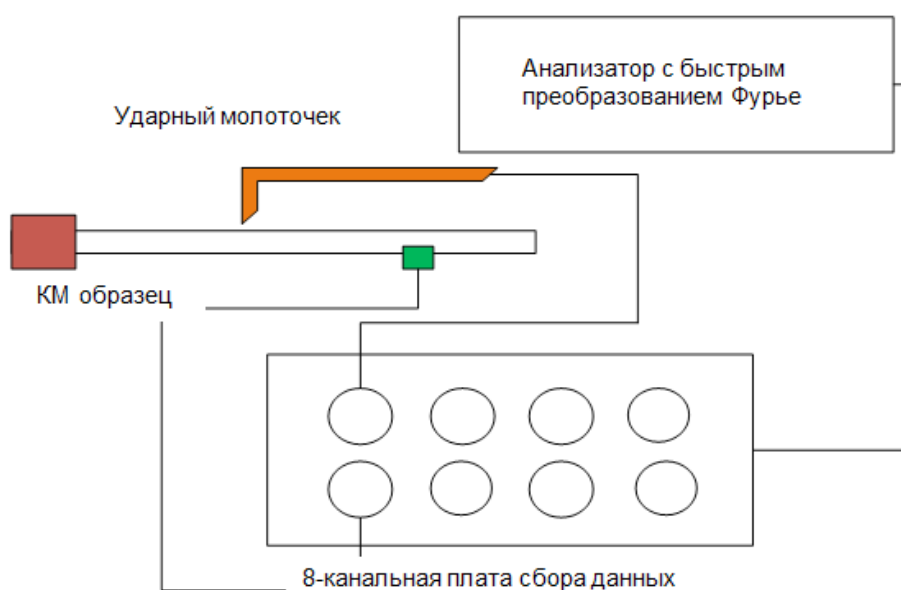


Рис. 4. Экспериментальная установка для изучения собственных колебаний

Fig. 4. Free vibration setup

коэффициента затухания могут быть выполнены с помощью системы сбора данных DEWE. В зависимости от резонансного пика частотной характеристики изначально были четко видны три пика; были извлечены соответствующие этим пикам собственные частоты. По методу аппроксимирующих кругов для расчета коэффициента затухания использовался график Найквиста (nyquist). Метод аппроксимирующих кругов учитывал только несколько мест по соседству с ответом, поэтому пиковая амплитуда мало влияла на результаты. Расположение пика отклика лежит на дуге окружности при использовании метода аппроксимирующих кругов. Рис. 5 иллюстрирует типичный

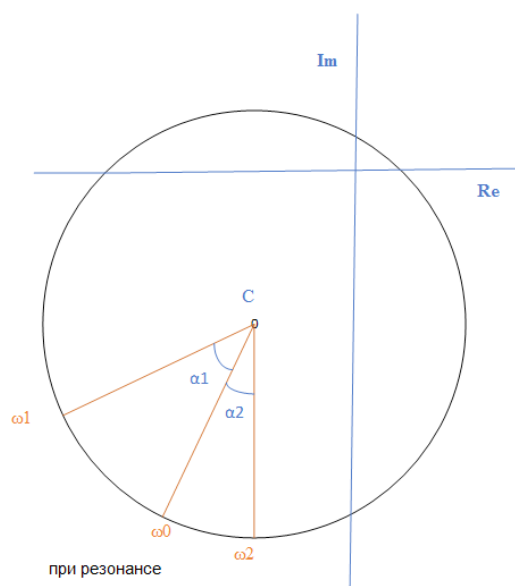


Рис. 5. График Найквиста для метода аппроксимирующих кругов

Fig. 5. Nyquist plot for fitting circle method

график Найквиста, использующий подход круга подгонки. Формула для расчета коэффициента затухания:

$$\zeta = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2\omega_0 \left[\omega_2 \tan \frac{\alpha_2}{2} + \omega_1 \tan \frac{\alpha_1}{2} \right]},$$

где ω_0 – угловая резонансная частота; ω_1, ω_2 – угловые частоты; α_1, α_2 – углы между угловыми частотами.

Результаты и их обсуждение

В настоящем исследовании после получения композиционного материала из него изготовили образцы, масса и размер которых приведены в табл. 1.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что увеличение массы композиционного материала происходит преимущественно из-за увеличения массы смолы. Соответственно в исследованиях композиционных материалов влияние массы обусловлено массой смолы. Для настоящего исследования были выбраны джутовые волокна в четырехслойном корзиночном переплетении из-за их способности равномерно распределять силу как в направлении основы, так и в направлении утка. По мере увеличения количества слоев в композите улучшаются его качества.

Испытание на растяжение

Испытание на растяжение проводили на универсальной разрывной машине для разного процентного содержания NaOH и разного времени

Таблица 1

Table 1

Масса и размер образцов
Weight and Size of specimen

| № | Тип (толщина) | Масса, г |
|---|-------------------------------------|----------------|
| 1 | Однослойный (~4 мм) | 16–18 |
| 2 | Двухслойный (~4 мм) | 18–19 |
| 3 | Трехслойный (~4 мм) | 21–22 |
| 4 | Четырехслойный (~4 мм) | 24–25 |
| | Тип испытания | Размер образца |
| 1 | На растяжение (ASTM D-638) | 30×3 см |
| 2 | На изгиб (ASTM D-790) | 125×12,7 мм |
| 3 | На прочность при ударе (ASTM D-256) | 63,5×12,7 мм |
| 4 | На свободные колебания | 170×17 мм |

обработки поверхности волокон. Результаты представлены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, обработка поверхности улучшает временное сопротивление разрушению при растяжении и модуль упругости примерно на 12 и 40 % соответственно. Из этого можно сделать вывод, что влияние времени выдержки при обработке поверхности волокон раствором NaOH не приводит к значительному улучшению характеристик композиционного материала при растяжении; повышение временного сопротивления разрушению при растяжении настолько минимально, что его можно не заметить. Аналогичные результаты получены при увеличении процентного содержания NaOH. Это указывает на то, что при применении щелочи лигнин и гемицеллюлоза быстро удаляются из волокон.

Очевидно, что самое высокое значение временного сопротивления разрушению при растяжении для КМ с корзиночным плетением составляет $50 \pm 1,17$ МПа при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 1 часа, а его модуль упругости при растяжении – $1,94 \pm 0,23$ ГПа. Второе по величине значение временного сопротивления разрушению при растяжении для КМ с корзиночным плетением составляет $49 \pm 0,60$ МПа при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа, а его модуль упругости при растяжении – $1,90 \pm 0,10$ ГПа. Самое низкое значение временного сопротивления разрушению при растяжении для КМ с корзиночным плетением составляет $48 \pm 0,61$ МПа при предварительной

обработке 1%-м раствором щелочи в течение 30 минут, а его модуль упругости при растяжении – $1,90 \pm 0,11$ ГПа. Второе и последнее самое низкое значение временного сопротивления разрушению при растяжении для КМ с корзиночным плетением составляет $48,8 \pm 2,61$ МПа при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 30 минут, а его модуль упругости при растяжении – $1,91 \pm 0,18$ ГПа.

Испытание на изгиб

Для изучения прочности на изгиб и модуля изгиба проведено соответствующее испытание, его результаты представлены в табл. 3.

По результатам описанных выше испытаний видно, что поверхностная обработка композиционных материалов повышает их способность к изгибу. Наибольшее значение предела прочности на изгиб и модуля упругости при изгибе было обнаружено при предварительной выдержке в 4%-м растворе NaOH в течение 1 часа. По сравнению с другими результатами результаты с часовой выдержкой в 4%-м растворе щелочи заметно выше. Это может быть вызвано увеличением содержания целлюлозы и максимально возможной адгезией между волокнами и матрицей. Предел прочности на изгиб и изменение модуля упругости не сильно отличаются для трех других комбинаций. Увеличение предела прочности на изгиб и модуля упругости слоистых образцов без предварительной обработки поверхности составляет около 10,40 и 32,24 % соответственно. Таким образом, можно сказать, что обработка

Таблица 2

Table 2

Поведение тканого джутового композита при испытании на растяжение

Tensile test behavior of woven jute composite

| Количество слоев | Тип плетения, концентрация NaOH и время выдержки | Временное сопротивление разрушению, МПа | Модуль упругости при растяжении, ГПа |
|------------------|--|---|--------------------------------------|
| 4 | Корзиночное (30 мин, 1 %) | $48 \pm 0,61$ | $1,90 \pm 0,11$ |
| | Корзиночное (1 час, 1 %) | $49 \pm 0,60$ | $1,90 \pm 0,10$ |
| | Корзиночное (30 мин, 4 %) | $48,8 \pm 2,61$ | $1,91 \pm 0,18$ |
| | Корзиночное (1 час, 4 %) | $50 \pm 1,17$ | $1,94 \pm 0,23$ |
| Количество слоев | Тип плетения, без выдержки в NaOH | Временное сопротивление разрушению, МПа | Модуль упругости при растяжении, ГПа |
| 4 | Корзиночное | $43,60 \pm 2,3$ | $1,15 \pm 0,27$ |

Таблица 3

Table 3

Поведение тканого джутового композита при испытании на изгиб
Flexural test behavior of woven jute composite

| Количество слоев | Тип плетения, концентрация NaOH и время выдержки | Предел прочности на изгиб, МПа | Модуль упругости при изгибе, ГПа |
|------------------|--|--------------------------------|----------------------------------|
| 4 | Корзиночное (30 мин, 1 %) | $70,6 \pm 0,20$ | $2,6 \pm 0,11$ |
| | Корзиночное (1 час, 1 %) | $71,7 \pm 0,60$ | $3,2 \pm 0,10$ |
| | Корзиночное (30 мин, 4 %) | $70 \pm 0,60$ | $2,8 \pm 0,18$ |
| | Корзиночное (1 час, 4 %) | $95 \pm 1,17$ | $3,99 \pm 0,23$ |
| Количество слоев | Тип плетения, без выдержки в NaOH | Предел прочности на изгиб, МПа | Модуль упругости при изгибе, ГПа |
| 4 | Корзиночное | $69,44 \pm 0,60$ | $2,38 \pm 0,11$ |

поверхности значительно улучшает характеристики слоистого материала при его испытании на изгиб.

Очевидно, что самое высокое значение предела прочности на изгиб для КМ с корзиночным плетением составляет $95 \pm 1,17$ МПа при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 1 часа, а его модуль упругости при изгибе – $3,99 \pm 0,23$ ГПа. Второе по величине значение предела прочности на изгиб для КМ с корзиночным плетением составляет $71,7 \pm 0,60$ МПа при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа, а его модуль упругости при изгибе – $3,2 \pm 0,10$ ГПа. Самое низкое значение предела прочности на изгиб для КМ с корзиночным плетением составляет $70,6 \pm 0,20$ МПа при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 30 минут, а его модуль упругости при изгибе – $2,6 \pm 0,11$ ГПа. Второе и последнее самое низкое значение предела прочности на изгиб для КМ с корзиночным плетением

составляет $70 \pm 0,60$ МПа при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 30 минут, а его модуль упругости при растяжении – $2,8 \pm 0,18$ ГПа.

Испытание на прочность при ударе

Испытание на прочность при ударе было проведено на тканом джутовом композите для исследования энергии удара, результаты представлены в табл. 4. Энергия удара по стандарту ASTM измеряется в джоулях на метр (Дж/м) или фут-фунтах на дюйм (фут-фунт/дюйм). Ударная вязкость вычисляется путем деления значения энергии удара (в джоулях или фут-фунтах) на толщину надреза (в миллиметрах или дюймах) образца в среднем для пяти циклов испытаний. Метод ISO немного отличается: ударная вязкость рассчитывается в килоджоулях на кв. метр (кДж/м^2) из энергии удара в джоулях по площади под надрезом. Это испытание проводится на 10 образцах, результаты усредняются.

Таблица 4

Table 4

Испытание на прочность при ударе тканого джутового композита
Impact test of woven jute composite

| Количество слоев | Тип плетения, концентрация NaOH и время выдержки | Энергия удара, Дж/м |
|------------------|--|---------------------|
| 4 | Корзиночное (30 мин, 1 %) | 272 ± 23 |
| | Корзиночное (1 час, 1 %) | 274 ± 24 |
| | Корзиночное (30 мин, 4 %) | 278 ± 25 |
| | Корзиночное (1 час, 4 %) | 280 ± 26 |
| Количество слоев | Тип плетения, без выдержки в NaOH | Энергия удара, Дж/м |
| 4 | Корзиночное | 250 ± 26 |

Результаты испытания указывают на способность материала накапливать энергию при нагружении. Согласно табл. 4, работа ударного разрушения композита значительно увеличилась после обработки поверхности, примерно на 10 %.

Хорошо видно, что самое высокое значение энергии удара для КМ с корзиночным плетением составляет 280 ± 26 Дж/м при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 1 часа; самое низкое значение энергии удара для КМ с корзиночным плетением составляет 278 ± 25 Дж/м при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 30 минут. При предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа значение энергии удара для КМ с корзиночным плетением составляет 274 ± 24 Дж/м, а второе и последнее самое низкое значение энергии удара для КМ с корзиночным плетением составляет 272 ± 23 Дж/м при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 30 минут.

Определение собственных колебаний

Результаты испытаний на свободные колебания, проведенных на четырехслойном джутовом композиционном материале с корзиночным плетением предварительно обработанных волокон, представлены в табл. 5.

Из приведенных результатов исследования очевидно, что обработка поверхности улучшает

вибрационные характеристики композита. Кроме того, показано, что изменения колебательных характеристик составляют всего 3 %, что не очень существенно, независимо от повышения концентрации NaOH и продолжительности выдержки волокна в щелочи.

Испытание на свободную вибрацию было проведено на экспериментальной установке. В этом эксперименте были получены три собственные частоты, связанные с коэффициентом затухания с помощью аппроксимирующего круга.

Первая мода из трех частот для КМ с корзиночным плетением при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 30 минут найдена как 75,493, 422,72, 1387,0 и связана с коэффициентом затухания 0,06224, 0,024813, 0,044182.

Вторая мода из трех частот для КМ с корзиночным плетением при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение 30 минут найдена как 75,81, 427,06, 909,0 и связана с коэффициентом затухания 0,0468, 0,0500, 0,04479.

Третья мода из трех частот для КМ с корзиночным плетением при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа найдена как 76,55, 484,78, 1200 и связана с коэффициентом затухания 0,068, 0,066, 0,0706.

Последняя мода из трех частот для КМ с корзиночным плетением при предварительной обработке 4%-м раствором щелочи в течение

Таблица 5

Table 5

Результаты испытаний на свободные колебания

Free vibration test results

| Количество слоев | Тип плетения, концентрация NaOH и время выдержки | Свободное граничное условие (собственные колебания (Гц) и соответствующий коэффициент затухания) | | |
|------------------|--|--|--------------------|--------------------|
| 4 | Корзиночное (30 мин, 1 %) | 75,493 0,06224 | 422,72 0,024813 | 1387,0 0,044182 |
| | Корзиночное (1 час, 1 %) | 75,81 0,0468 | 427,06 0,0500 | 909,0 0,04479 |
| | Корзиночное (30 мин, 4 %) | 76,55 0,068 | 484,78 0,066 | 1200 0,0706 |
| | Корзиночное (1 час, 4 %) | 77,837 0,055 | 494,30 0,038071 | 806 0,0377 |
| Количество слоев | Тип плетения, без выдержки в NaOH | Свободное граничное условие (собственные колебания (Гц) и соответствующий коэффициент затухания) | | |
| 4 | Корзиночное | 68,4 0,0455 | 410,2 0,0353 | 1079,1 0,0364 |

1 часа найдена как 77,837, 494,30, 806 и связана с коэффициентом затухания 0,055, 0,038071, 0,0377.

ИКФС-анализ

ИКФС-анализ был проведен для исследования функциональной группы в композите. Для ИКФС-анализа использовали образец в виде порошка; полученные данные отражены на графике (рис. 6).

Пик в области $650\text{--}2000\text{ см}^{-1}$ свидетельствует о наличии одинарных и двойных связей углерода с азотом, углеродом и кислородом согласно сравнению приведенного графика ИКФС со стандартным графиком. Пики в диапазоне 3000 см^{-1} указывают на наличие функциональной группы О-Н, которая придает композитам их гидрофильный характер. Этот композит впитывает влагу, что ограничивает его использование в ситуациях, когда люди подвергаются воздействию воды.

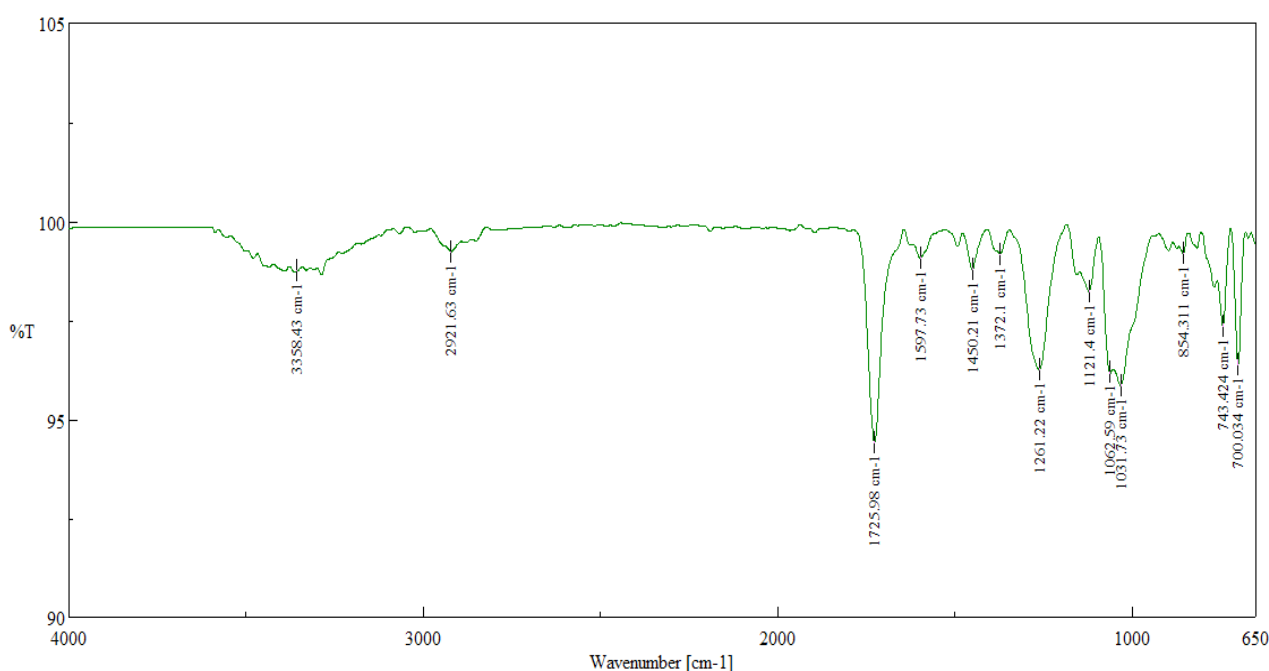


Рис. 6. Композиционный материал с корзиночным плетением при предварительной обработке 1%-м раствором щелочи в течение 1 часа

Fig. 6. Basket type 1% NaOH with one-hour soaking time duration

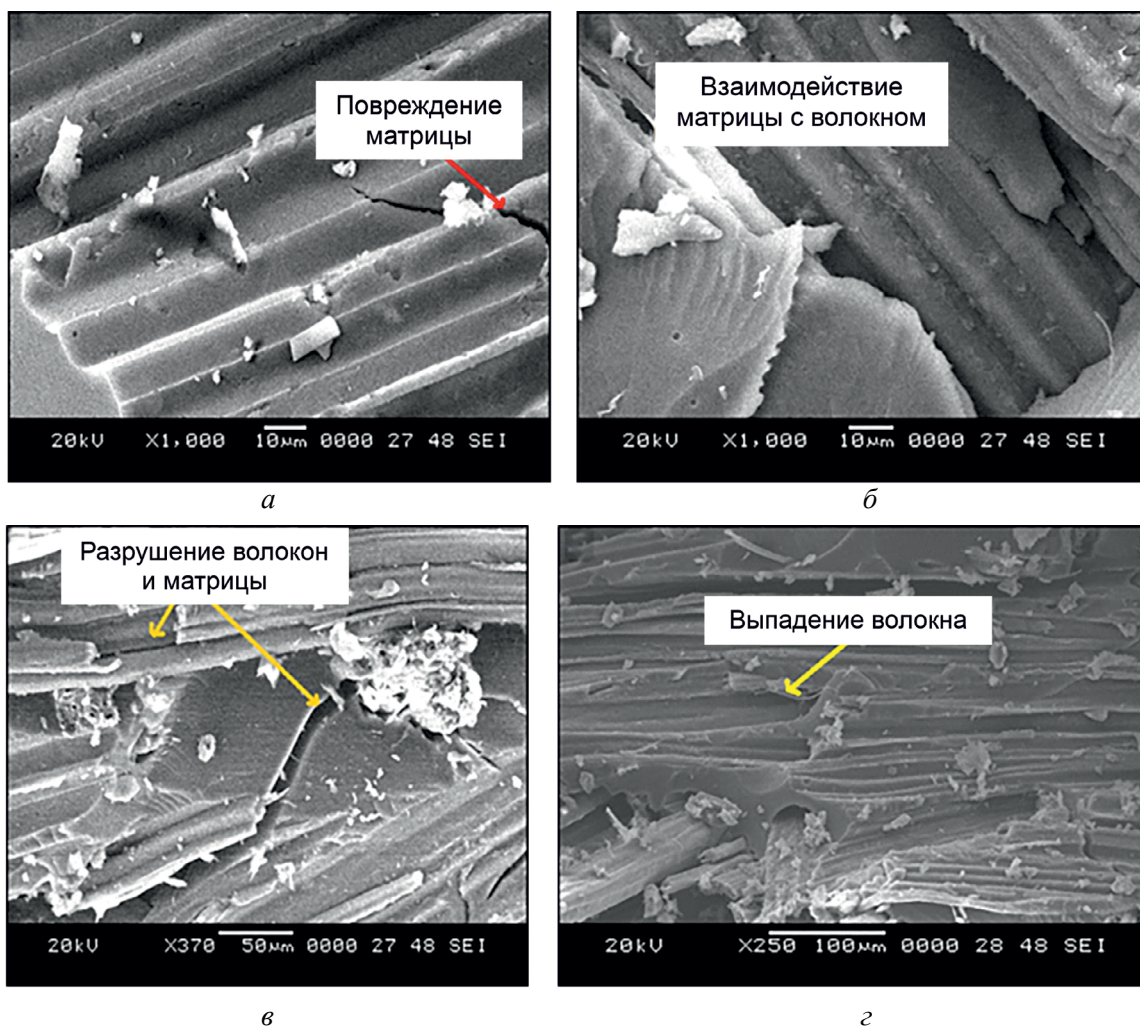
Строение поверхности

Для анализа взаимодействия волокнистой матрицы с полимерным композитом было проведено исследование изображений при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). СЭМ-изображения композитного материала представлены на рис. 7.

На рис. 7 показан характер взаимодействия волокон и матрицы композиционного материала. Так, на рис. 7, в видно разрушение матрицы в направлении, противоположном приложенной силе, что свидетельствует о ее хрупкости. При использовании джутовых волокон для упрочнения матрицы (рис. 7, а) разрушение происходит

под углом, что свидетельствует о повышении пластичности композита. На рис. 7, б, г также видно, что сначала разрушилась матрица, а затем волокна, — это указывает на то, что волокна в композите должны были выдерживать самые большие нагрузки. Матрица также служила связующим для джутовых волокон.

М. Раджеш и др. [1, 3–5] и Савендра Пратап Сингх [2] работали над композиционными материалами из плетеного джутового волокна и отметили их повышенные свойства. Однако они исследовали КМ на основе одного, двух и трех слоев плетеного джутового волокна в различных комбинациях. В настоящей исследовательской работе авторы рассмотрели композиционный



а

б

в

г

Рис. 7. СЭМ-изображения композитного материала:

а – повреждение матрицы; б – взаимодействие матрицы с волокном; в – разрушение волокон и матрицы; г – выпадение волокна

Fig. 7. SEM images of composite:

а – matrix damage; б – fibre matrix interaction; в – failure of fibres and matrix; г – fibre pulling out

материал на основе четырех слоев плетеного джутового волокна. Авторы выполнили предварительную обработку поверхности волокон и выявили ее положительное влияние на свойства. Это открывает перспективы для дальнейшего конструкционного использования такого композиционного материала и замены им КМ на основе синтетических волокон, что снизит уровень загрязнения окружающей среды синтетическими отходами.

Закключение

Согласно исследованию, композит на основе натурального волокна обладает превосходными механическими свойствами и характеристиками свободных колебаний, что делает его пригодным

для использования в условиях низкого и среднего нагружения. Механические характеристики и характеристики свободных колебаний джутовых волокон значительно повышаются после обработки поверхности NaOH, но концентрация щелочи и время выдержки в ней волокон не оказывают существенного влияния на качество композита в целом. Гидрофильный характер композита выявлен в результате ИКФС-анализа, это препятствует его применению во влажной среде. СЭМ-анализ показывает, что по мере увеличения количества волокна композитный материал изменяется от хрупкого до пластичного. Заключение по исследованию свободных колебаний и механического поведения обработанного тканого джутового полимерного композита будет зависеть от конкретных выводов и результатов,



полученных в результате исследования. Однако можно сделать некоторые выводы.

1. Улучшение механических свойств. Обработка тканого джутового полимерного композита может привести к улучшению механических свойств по сравнению с необработанным композитом. Процесс обработки может включать такие методы, как химическая модификация, обработка поверхности или введение армирующего агента. Эти методы обработки могут улучшить прочность и жесткость композиционного материала, а также устойчивость к деформации.

2. Улучшение вибропоглощения. Анализ свободных колебаний помогает оценить динамическое поведение материалов и конструкций. Обработанные тканые джутовые полимерные композиты могут демонстрировать улучшенные характеристики поглощения вибрации по сравнению с необработанными композитами. Процесс обработки может изменить границу раздела волоконной матрицы, что приведет к улучшению рассеивания энергии при вибрациях и увеличению демпфирующей способности.

Список литературы

1. *Rajesh M., Singh S.P., Pitchaimani J.* Mechanical behavior of woven natural fiber fabric composites: Effect of weaving architecture, intra-ply hybridization and stacking sequence of fabrics // *Journal of Industrial Textiles.* – 2018. – Vol. 47 (5). – P. 938–959. – DOI: 10.1177/1528083716679157.
2. *Singh S.P.* FTIR spectroscopy & mechanical behaviour study on jute fiber polymer composite // *Journal of Advanced Engineering Research.* – 2019. – Vol. 6 (1). – P. 34–38.
3. The hygroscopic effect on dynamic and thermal properties of woven jute, banana, and intra-ply hybrid natural fiber composites / M. Rajesh, K. Jayakrishna, M.T.H. Sultan, M. Manikandan, V. Mugeshkannan, A.U.M. Shah, S.N.A. Safri // *Journal of Materials Research and Technology.* – 2020. – Vol. 9 (5). – P. 10305–10315. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.033.
4. *Rajesh M., Pitchaimani J.* Experimental investigation on buckling and free vibration behavior of woven natural fiber fabric composite under axial compression // *Composite Structures.* – 2016. – Vol. 163. – P. 302–311. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.12.046.
5. *Rajesh M., Pitchaimani J.* Mechanical properties of natural fiber braided yarn woven composite: comparison with conventional yarn woven composite // *Journal of Bionic Engineering.* – 2017. – Vol. 14. – P. 141–150. – DOI: 10.1016/S1672-6529(16)60385-2.
6. Fatigue life and residual strength of a short-natural-fiber-reinforced plastic vs Nylon / M. Mejri, L. Toubal, J.C. Cuillière, V. François // *Composites. Part B: Engineering.* – 2017. – Vol. 110. – P. 429–441. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.036.
7. *Tian F., Zhong Z.* Modeling of load responses for natural fiber reinforced composites under water absorption // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing.* – 2019. – Vol. 125. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105564.
8. *Sarikaya E., Çallioğlu H., Demirel H.* Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties // *Composites. Part B: Engineering.* – 2019. – Vol. 167. – P. 461–466. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.03.020.
9. Effect of natural fiber reinforced polymers on confined compressive strength of concrete / T. Jirawattanasomkul, T. Ueda, S. Likitlersuang, D. Zhang, N. Hanwiboonwat, N. Wuttiwannasak, K. Horsangchai // *Construction and Building Materials.* – 2019. – Vol. 223. – P. 156–164. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.217.
10. Characterization of silane treated and untreated natural cellulosic fiber from corn stalk waste as potential reinforcement in polymer composites / Y. Liu, X. Lv, J. Bao, J. Xie, X. Tang, J. Che, Y. Ma, J. Tong // *Carbohydrate Polymers.* – 2019. – Vol. 218. – P. 179–187. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.04.088.
11. Study on the acoustic characteristics of natural date palm fibers: Experimental and theoretical approaches / E. Taban, A. Khavanin, A. Ohadi, A. Putra, A.J. Jafari, M. Faridan, A. Soleimanian // *Building and Environment.* – 2019. – Vol. 161. – P. 106274. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106274.
12. *Devnani G.L., Sinha S.* Effect of nanofillers on the properties of natural fiber reinforced polymer composites // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – Vol. 18, pt. 3. – P. 647–654. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.460.
13. Elemental analysis of brake pad using natural fibers / S. Sri Karthikeyan, E. Balakrishnan, S. Meganathan, M. Balachander, A. Ponshanmugakumar // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – Vol. 16, pt.2. – P. 1067–1074. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.197.
14. *Singh S.P., Dutt A., Hirwani C.K.* Experimental and numerical analysis of different natural fiber polymer composite // *Materials and Manufacturing Processes.* – 2023. – Vol. 38, iss. 3. – P. 322–332. – DOI: 10.1080/10426914.2022.2136379.
15. Mechanical behaviour of Natural and Glass fiber reinforced with polymer matrix composite / M. Balachandar, B. Vijaya Ramnath, P. Jagadeeshwar, R. Yokeshe // *Materials Today: Proceedings.* – 2019. – Vol. 16, pt. 2. – P. 1297–1303. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.227.
16. *Bakri M.K.B., Jayamani E.* Comparative study of functional groups in natural fibers: Fourier transform infrared analysis (Ftir) // *International Journal of Current*

Engineering and Scientific Research (IJCESR). – 2016. – Vol. 3 (1). – P. 154–161.

17. Jayamani E., Loong T.G., Bakri M.K.B. Comparative study of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis of natural fibres treated with chemical, physical and biological methods // Polymer Bulletin. – 2020. – Vol. 77. – P. 1605–1629. – DOI: 10.1007/s00289-019-02824-w.

18. Fabrication and characterization of coir/carbon-fiber reinforced epoxy based hybrid composite for helmet shells and sports-good applications: influence of fiber surface modifications on the mechanical, thermal and morphological properties / Y. Singh, J. Singh, S. Sharma, T.-D. Lam, D.-N. Nguyen // Journal of Material Research and Technology. – 2020. – Vol. 9 (6). – P. 15593–15603. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.023.

19. Natural fiber-reinforced thermoplastic composites from woven-nonwoven textile preforms: Mechanical and fire performance study / B.K. Kandola, S.I. Mistik, W. Pornwannachai, S.C. Anand // Composites Part B: Engineering. – 2018. – Vol. 153. – P. 456–464. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.09.013.

20. Sekaran A.S.J., Kumar K.P. Study on drilling of woven sisal and aloe vera natural fiber polymer composite // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 16, pt. 2. – P. 640–646. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.140.

21. Fabrication and mechanical property evaluation of non-woven banana fiber epoxy-based polymer composite / S.P. Gairola, Y.K. Tyagi, B. Gangil, A. Sharma // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 44 (6). – P. 3990–3996. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.103.

22. Baghaei B., Skrifvars M., Berglin L. Characterization of thermoplastic natural fiber composites made from woven hybrid yarn prepreps with different

weave pattern // Composites: Part A. – 2015. – Vol. 76. – P. 154–161. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.05.029.

23. Venkatesha B.K., Saravanan R., Anand Babu K. Effect of moisture absorption on woven bamboo/glass fiber reinforced epoxy hybrid composites // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 45, pt. 1. – P. 216–221. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.421.

24. Arumugam C., Arumugam S., Muthusamy S. Mechanical, thermal and morphological properties of unsaturated polyester/chemically treated woven kenaf fiber/AgNPs@PVA hybrid nano bio composites for automotive applications // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9 (6). – P. 15298–15312. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.084.

25. Chemical and mechanical reprocessed resins and bio-composites based on five epoxidized vegetable oils thermosets reinforced with flax fibers or PLA woven / C. Di Mauro, A. Genua, M. Rymarczyk, C. Dobbels, S. Malburet, A. Graillot, A. Mija // Composites Science and Technology. – 2021. – Vol. 205. – P. 108678. – DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108678.

26. Experimental investigation on the mechanical properties of woven hybrid fiber reinforced epoxy composite / V. Santhanam, R. Dhanaraj, M. Chandrasekaran, N. Venkateshwaran, S. Baskar // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 37 (2). – P. 1850–1853. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.444.

27. Mechanical and dynamic mechanical thermal properties of ensete fiber/woven glass fiber fabric hybrid composites / T.A. Negawo, Y. Polat, Y. Akgul, A. Kilic, M. Jawaaid // Composite Structures. – 2021. – Vol. 259. – P. 113221. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113221.

28. Bhattacharjee A., Roy H. Assessment of tensile and damping behaviour of hybrid particle/woven fiber/polymer composites // Composite Structures. – 2020. – Vol. 244. – P. 112231. – DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112231.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 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



Free vibration and mechanical behavior of treated woven jute polymer composite

Savendra Singh ^{a, *}, Chetan Hirwani ^b

Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Patna, Patna, Bihar, 800005, India

^a  <https://orcid.org/0000-0002-5151-0284>,  savendrasingh123@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-4291-4575>,  hirwani.ck22@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 20 June 2023

Revised: 30 June 2023

Accepted: 10 July 2023

Available online: 15 September 2023

Keywords:

Natural fiber

FTIR

Surface treatment

Natural frequency

Damping

Free vibration

SEM

Acknowledgements

Authors are very thankful to Rajkiya Engineering College, Azamgarh for providing laboratory for research work.

ABSTRACT

Introduction: Recently, the use of natural fibers have been increased to replace the use of synthetic fibers to save our environment from waste disposal problems, natural fibers have a lower level of mechanical properties. **The purpose of work:** This study examines the effect of treating the surface and deeper layers of jute fiber on the mechanical behavior and characteristics of free vibrations of a composite material based on it. **The methods of investigation:** due to the uniform distribution of stresses in the *WARP* and *WEFT* directions, four-layer basket weave jute fibers were used in this study. **Result and discussion:** the mechanical and free vibration properties of composite materials are significantly improved when *NaOH* is applied to jute fibers because it eliminates the weak matrix material lignin and makes the fibers stiffer and stronger. However, increasing the percentage of *NaOH* and soaking time for the fibers in *NaOH* solution have little effect on these properties. The highest value of tensile strength and tensile modulus are found 50 ± 1.17 MPa and 1.94 ± 0.23 GPa respectively seen in case of basket weave jute fiber composite with 1 hour treatment. Tensile strength and tensile modulus increase about 12 % and 40 % over the stokes value, respectively. Similarly the value of flexural strength and flexural modulus are found 95 ± 1.17 MPa and 3.99 ± 0.23 GPa respectively in case of basket weave jute fiber composite with 1 hour treatment. It also shows the highest value of fundamental frequency 77.837 Hz. The presence of an *O-H* bond in the composite, as revealed by *FTIR* study, gives it a hydrophilic character and limits its use in humid environments. The fiber to matrix ratio is shown in *SEM* images.

For citation: Singh S.P., Hirwani C.K. Free vibration and mechanical behavior of treated woven jute polymer composite. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2023, vol. 25, no. 3, pp. 137–151. DOI: 10.17212/1994-6309-2023-25.3-137-151. (In Russian).

References

1. Rajesh M., Singh S.P., Pitchaimani J. Mechanical behavior of woven natural fiber fabric composites: Effect of weaving architecture, intra-ply hybridization and stacking sequence of fabrics. *Journal of Industrial Textiles*, 2018, vol. 47 (5), pp. 938–959. DOI: 10.1177/1528083716679157.
2. Singh S.P. FTIR spectroscopy & mechanical behaviour study on jute fiber polymer composite. *Journal of Advanced Engineering Research*, 2019, vol. 6 (1), pp. 34–38.
3. Rajesh M., Jayakrishna K., Sultan M.T.H., Manikandan M., Mugeshkannan V., Shah A.U.M., Safri S.N.A. The hydroscopic effect on dynamic and thermal properties of woven jute, banana, and intra-ply hybrid natural fiber composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9 (5), pp. 10305–10315. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.07.033.

* Corresponding author

Singh Savendra Pratap, Assistant professor
 Department of Mechanical Engineering
 National Institute of Technology Patna,
 800005, Patna, Bihar, India

Tel.: +91-9455446960, e-mail: savendrasingh123@gmail.com

4. Rajesh M., Pitchaimani J. Experimental investigation on buckling and free vibration behavior of woven natural fiber fabric composite under axial compression. *Composite Structures*, 2016, vol. 163, pp. 302–311. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.12.046.
5. Rajesh M., Pitchaimani J. Mechanical properties of natural fiber braided yarn woven composite: comparison with conventional yarn woven composite. *Journal of Bionic Engineering*, 2017, vol. 14, pp. 141–150. DOI: 10.1016/S1672-6529(16)60385-2.
6. Mejri M., Toubal L., Cuillière J.C., François V. Fatigue life and residual strength of a short- natural-fiber-reinforced plastic vs Nylon. *Composites. Part B: Engineering*, 2017, vol. 110, pp. 429–441. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.11.036.
7. Tian F., Zhong Z. Modeling of load responses for natural fiber reinforced composites under water absorption. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 125. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105564.
8. Sarikaya E., Çallioğlu H., Demirel H. Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties. *Composites. Part B: Engineering*, 2019, vol. 167, pp. 461–466. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.03.020.
9. Jirawattanasomkul T., Ueda T., Likitlersuang S., Zhang D., Hanwiboonwat N., Wuttiwannasak N., Horsangchai K. Effect of natural fiber reinforced polymers on confined compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 223, pp. 156–164. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.217.
10. Liu Y., Lv X., Bao J., Xie J., Tang X., Che J., Ma Y., Tong J. Characterization of silane treated and untreated natural cellulosic fiber from corn stalk waste as potential reinforcement in polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, 2019, vol. 218, pp. 179–187. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.04.088.
11. Taban E., Khavanin A., Ohadi A., Putra A., Jafari A.J., Faridan M., Soleimani A. Study on the acoustic characteristics of natural date palm fibers: Experimental and theoretical approaches. *Building and Environment*, 2019, vol. 161, p. 106274. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106274.
12. Devnani G.L., Sinha S. Effect of nanofillers on the properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 18, pt. 3, pp. 647–654. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.06.460.
13. Sri Karthikeyan S., Balakrishnan E., Meganathan V., Balachander M. Elemental analysis of brake pad using natural fibers. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 16, pt. 2, pp. 1067–1074. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.197.
14. Singh S.P., Dutt A., Hirwani C.K. Experimental and numerical analysis of different natural fiber polymer composite. *Materials and Manufacturing Processes*, 2023, vol. 38, iss. 3, pp. 32–332. DOI: 10.1080/10426914.2022.2136379.
15. Balachandar M., Vijaya Ramnath B., Jagadeeshwar P., Yokesh R. Mechanical behaviour of Natural and Glass fiber reinforced with polymer matrix composite. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 16, pt. 2, pp. 1297–1303. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.227.
16. Bakri M.K.B., Jayamani E. Comparative study of functional groups in natural fibers: Fourier transform infrared analysis (Ftir). *International Journal of Current Engineering and Scientific Research (IJCESR)*, 2016, vol. 3 (1), pp. 154–161.
17. Jayamani E., Loong T.G., Bakri M.K.B. Comparative study of Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis of natural fibres treated with chemical, physical and biological methods. *Polymer Bulletin*, 2020, vol. 77, pp. 1605–1629. DOI: 10.1007/s00289-019-02824-w.
18. Singh Y., Singh J., Sharma S., Lam T.-D., Nguyen D.-N. Fabrication and characterization of coir/carbon-fiber reinforced epoxy based hybrid composite for helmet shells and sports-good applications: influence of fiber surface modifications on the mechanical, thermal and morphological properties. *Journal of Material Research and Technology*, 2020, vol. 9 (6), pp. 15593–15603. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.11.023.
19. Kandola B.K., Mistik S.I., Pornwannachai W., Anand S.C. Natural fiber-reinforced thermoplastic composites from woven-nonwoven textile preforms: Mechanical and fire performance study. *Composites Part B: Engineering*, 2018, vol. 153, pp. 456–464. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.09.013.
20. Sekaran A.S.J., Kumar K.P. Study on drilling of woven sisal and aloe vera natural fiber polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 16, pt. 2, pp. 640–646. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.05.140.
21. Gairola S.P., Tyagi Y.K., Gangil B., Sharma A. Fabrication and mechanical property evaluation of non-woven banana fiber epoxy-based polymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 44 (6), pp. 3990–3996. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.103.
22. Baghaei B., Skrifvars M., Berglin L. Characterization of thermoplastic natural fiber composites made from woven hybrid yarn prepregs with different weave pattern. *Composites: Part A*, 2015, vol. 76, pp. 154–161. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.05.029.

23. Venkatesha B.K., Saravanan R., Anand Babu K. Effect of moisture absorption on woven bamboo/glass fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 45, pt. 1, pp. 216–221. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.421.

24. Arumugam C., Arumugam S., Muthusamy S. Mechanical, thermal and morphological properties of unsaturated polyester/chemically treated woven kenaf fiber/AgNPs@PVA hybrid nano bio composites for automotive applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, vol. 9 (6), pp. 15298–15312. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.10.084.

25. Di Mauro C., Genua A., Rymarczyk M., Dobbels C., Malburet S., Graillot A., Mija A. Chemical and mechanical reprocessed resins and bio-composites based on five epoxidized vegetable oils thermosets reinforced with flax fibers or PLA woven. *Composites Science and Technology*, 2021, vol. 205, p. 108678. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108678.

26. Santhanam V., Dhanaraj R., Chandrasekaran M., Venkateshwaran N., Baskar S. Experimental investigation on the mechanical properties of woven hybrid fiber reinforced epoxy composite. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 37 (2), pp. 1850–1853. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.444.

27. Negawo T.A., Polat Y., Akgul Y., Kilic A., Jawaid M. Mechanical and dynamic mechanical thermal properties of ensete fiber/woven glass fiber fabric hybrid composites. *Composite Structures*, 2021, vol. 259, p. 113221. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.113221.

28. Bhattacharjee A., Roy H. Assessment of tensile and damping behaviour of hybrid particle/woven fiber/polymer composites. *Composite Structures*, 2020, vol. 244, p. 112231. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112231.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 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>).