

*Х. Праджанати<sup>а</sup>, А. Тевати<sup>а</sup>, А. Диксит<sup>б\*</sup>*

*<sup>а</sup>Faculty of Electrical and Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering,  
Netaji Subhas University of Technology, New Delhi, India, 110078*

*<sup>б</sup>Department of Mechanical and Automation Engineering, G. B. Pant Government Engineering  
College, New Delhi, India, 110020*

## **ДОСТИЖЕНИЯ В КОМПОЗИТАХ, АРМИРОВАННЫХ НАТУРАЛЬНЫМИ ВОЛОКНАМИ<sup>1</sup> ТЕМАТИЧЕСКИЙ ОБЗОР**

*H. Prajapati, A. Tevatia, and A. Dixit\**

### **ADVANCES IN NATURAL-FIBER-REINFORCED COMPOSITES: A TOPICAL REVIEW**

**Keywords:** natural fiber, biodegradability, cost, mechanical properties, moisture absorption

A rapid growth in the research and employment of natural-fiber composites (NFCs) has been observed in the last years. This is explained by their many advantages, such as the biodegradability, eco-friendliness, a relatively low cost, and good mechanical properties. Despite these advantages, they also possess some undesirable features, such as difficulties in processing, high fiber moisture absorption, low impact strength, low durability, poor fire resistance, and poor compatibility between fibers and matrix. Much effort has been applied to minimizing these issues in order to extend the capabilities and applications of this group of materials. In an attempt to provide a better insight into NFCs, an up-to-date review of their manufacturing routes, different applications, and mechanical performance is very required. This review aims to address the above-mentioned issues challenges encountered when dealing with such materials.

**Ключевые слова:** волокно натуральное, биоразлагаемость, стоимость, свойства механические, влагопоглощение

---

\*Автор, с которым следует вести переписку: [anuragdixitiitd@gmail.com](mailto:anuragdixitiitd@gmail.com)  
Corresponding author: [anuragdixitiitd@gmail.com](mailto:anuragdixitiitd@gmail.com)

<sup>1</sup>Перевод с англ.

В последние годы наблюдают быстрый рост количества исследований и использования композитов, армированных натуральными волокнами (КАНВ), обусловленный такими их преимуществами, как способность к биоразложению, экологичность, относительно низкая стоимость и хорошие механические свойства. Однако КАНВ обладают и некоторыми нежелательными характеристиками: трудность обработки, высокое влагопоглощение волокнами, низкая ударная прочность и долговечность, плохая огнестойкость и плохая совместимость волокон с матрицей. Приложено много усилий для минимизации этих проблем и расширения применимости этой группы материалов. Для лучшего понимания КАНВ необходим актуальный обзор способов их изготовления, применений и механических характеристик. Цель обзора — способствовать решению упомянутых проблем, возникающих при работе с такими материалами.

## Введение

Человека всегда интересовал поиск новых материалов, которые можно было бы использовать в большом количестве применений в разных областях. Композитные материалы используют в силу их механической прочности и эксплуатационной надежности [1, 2]. Их изготавливают из двух и более разных материалов [3, 4]. Производство синтетических составляющих материалов, таких как стекловолокна и небiorазлагаемые смолы, приводит к выбросу углекислого и других вредных газов, способствующих глобальному потеплению и загрязнению воздуха. Композиты, армированные стекловолокном, не подлежат полной переработке, поскольку по истечении срока эксплуатации исходные небiorазлагаемые компоненты нельзя полностью разделить и они становятся опасными для окружающей среды [5—8].

Биокомпозиты или композиты, армированные натуральными волокнами (КАНВ), представляют большой интерес в силу их полной биоразлагаемости и поэтому безвредности для окружающей среды [9—13]. Биокомпозиты состоят из натуральных волокон и разлагаемой смолы, получаемой из разных природных ресурсов, таких как овощи, животные и минералы [5, 12]. Биокомпозиты изготавливают из двух разных природных материалов — натуральных недревесных и древесных волокон [3, 14].

КАНВ могут быть использованы в автомобилестроении, поскольку они легче и дешевле обычных стекловолоконных композитов, с лучшим ударопоглощением, обеспечивают хорошую звукоизоляцию [15, 16]. Их можно использовать для изготовления перчаточных ящиков, дверных панелей, бионических рычагов и т. д. [17], они обладают большим потенциалом для промышленного применения [11]. Несмотря на такие недостатки, как поглощение влаги и ее долгое удержание, делающие натуральные волокна размеронестабильными, их используют для изготовления композитных

материалов в силу возобновляемости, большого количества сырья и меньшей стоимости [18].

В последние несколько лет разработка КАНВ вызвала большой интерес, поскольку они превосходят традиционные материалы с точки зрения биоразлагаемости и экологических характеристик [12, 19]. Смолы, производимые из соевого, кукурузного, рыбного и льняного масел, используют вместе с натуральными волокнами для создания полностью биоразлагаемых композитов [20, 21]. Автомобильная промышленность ориентирована на производство деталей, которые полностью разлагаются по истечении срока эксплуатации и могут быть переработаны [22]. Для удовлетворения растущего спроса на экологически чистые материалы в разных областях применения необходим современный обзор, позволяющий лучше понять поведение КАНВ, изготовленных с использованием рубленых натуральных волокон, что и является целью настоящей работы.

## 1. Характеристики натуральных волокон

**1.1. Натуральные волокна.** Свойства натуральных волокон зависят от используемого природного сырья [3]. Внешний вид натуральных волокон различен, но их внутренняя структура одинакова (рис. 1) [23]. Одиночная прядь волокон состоит из разных микрофибрилл, спирально ориентированных в разных слоях, расположенных над центральным внутренним каналом волокна; вторичные стенки отделяют слои микрофибрилл. Также существует аморфная область, состоящая из лигнина и гемицеллюлозы, а в сети микрофибрилл видна неупорядоченная структура кристаллической целлюлозы [23]. Лигнин — гетерополимер, состоящий из сложно организованного ароматического фенольного полимера, сшитого регулярным образом [24]. Гемицеллюлоза — гетерополимер с боковой цепью, состоящий из чередующихся единиц маннозы и глюкозы, пентозы и галактозы [25].



Рис. 1. Внутренняя структура типичной пряди натуральных волокон [23].

Табл. 1

Содержание компонентов и влаги (% по массе) в некоторых растительных волокнах [34]

Волокно	Лигнин	Целлюлоза	Гемицеллюлоза	Воск	Пектин	$\varphi$ , град	Влага
Хлопок	0,7—1,6	82,7	5,7	0,6	—	—	33–34
Сизаль	8—11	67—78	10—14,2	2	10	20	11
Ананас	5—12	70—82	—	—	—	14	11,8
Джут	12—13	61—71,5	13,6—20,4	0,5	0,2	8	12,6
Лен	2,2	71	18,6—20,6	1,7	2,3	10	10
Конопля	3,7—5,7	70,2—74,4	17,9—22,4	0,8	0,9	6,2	10,8
Рами	0,6—0,7	68,6—76,2	13,1—16,7	0,3	1,9	7,5	8

Содержание лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы в некоторых распространенных растительных волокнах приведено в табл. 1. Первичная стенка расположена под верхним слоем микрофибрилл. Благодаря такой сети микрофибрилл натуральные волокна обладают высокой прочностью [23].

Центральный внутренний канал — полый, а основное одиночное волокно образуется из внешнего стеблевого слоя растения [26]. Диаметр поперечного сечения одиночного волокна обычно варьируется от 10 до 30 мкм. Основные волокна, количество которых составляет от 8 до 50, собраны в пучки, соединенные пектином. Пучок основных волокон известен как техническое волокно, диаметр которого от 60 до 200 мкм [27]. При приложении нагрузки сеть микрофибрилл волокон переориентируется и растягивается в направлении нагрузки, обуславливая прочность волокна; при разгрузке микрофибриллы имеют тенденцию возвращения к исходной ориентации, но не могут ее достичь, если приложенная нагрузка превышает определенный предел, что свидетельствует о неупругости природных волокон [28, 29]. Натуральные волокна сильно анизотропны. В силу сшивки и разной структуры целлюлозы в определенных направлениях для нее характерны разные механизмы повреждения при воздействии нагрузки [30]. Упругие свойства КАНВ также зависят от угла спирали  $\varphi$  составляющих натуральных волокон, что увеличивает их анизотропию [31].

*1.1.1. Типы натуральных волокон.* В зависимости от источника классифицируют три типа натуральных волокон: растительные, животные и минеральные [3]. Минеральные волокна асбеста и слюды находятся в сильно закрытой упакованной форме и обладают преломляющей природой. Волокна животного происхождения имеют вид белков [1]. Эти волокна, также включающие волосы, волокна соединительной ткани, шелк и т. д., обладают значительной прочностью. Хотя одиночное волокно является слабым, их комбинация прочна. Растения, содержащие волокна, доступны в тропических лесах и сельскохозяйственных культурах [3].

Растительные волокна обычно получают из двух источников — первичного и вторичного. К первичному относят волокна, производимые в

качестве побочного продукта основных органических продуктов, таких как продукты питания, сырье и топливо для промышленного использования. К вторичному относят волокна из побочных продуктов, полученных в ходе изготовления органических продуктов. Растительные волокна (из растений, деревьев, травы и т. д.) обычно состоят из целлюлозы в разных формах. Эти волокна обычно обладают высокой прочностью при растяжении. Растительные волокна, содержащие в определенном количестве целлюлозу, классифицируют как зерновые, фруктовые, листовенные, стеблевые, древесные, травяные и тростниковые (рис. 2) [32].

Натуральные волокна недороги и доступны в большом количестве, но в силу гидрофильной природы склонны к влагопоглощению, способному значительно снизить механические свойства композитов. Если влага поглощается волокнами, в матрице возникают пустоты, влияющие на ме-

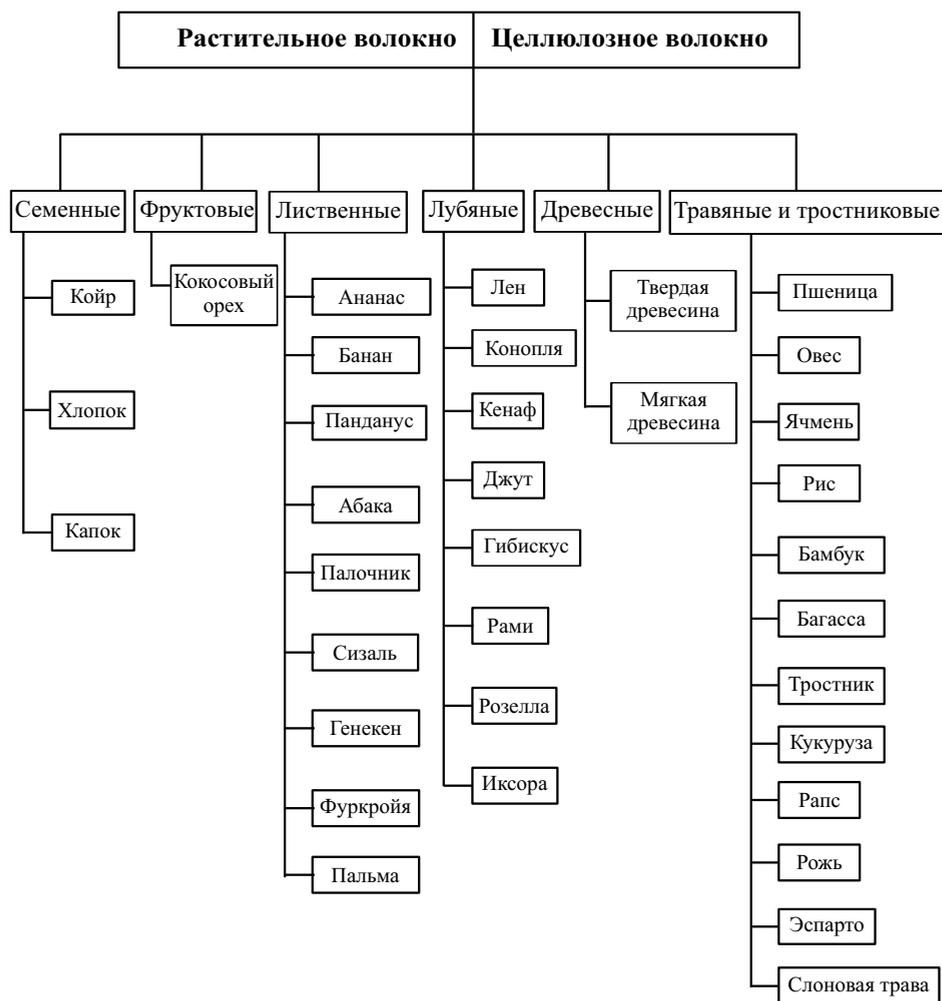


Рис. 2. Классификация растительных волокон [32].

Табл. 2

## Физико-механические свойства растительных волокон [1, 36, 37]

Волокно	$\sigma^{\text{tu}}$ , МПа	$E$ , ГПа	$\varepsilon^{\text{ult}}$ , %	$l/d$	$\phi$ , град	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$W$ , %
Хлопок	300—700	6—10	6—8	2752	20—30	1550	8,5
Капок	93,3	4	1,2	724	—	311—384	10,9
Бамбук	575	27	—	9259	—	1500	—
Лен	500—900	50—70	1,3—3,3	1258	12	1400—1500	12
Конопля	310—750	30—60	2—4	549	6,2	1400—1501	12
Джут	200—450	20—55	2—3	157	8,1	1300—1500	12
Кенаф	295—1191	22—60	—	119	—	1220—1400	17
Рами	915	23	3,7	4639	—	1550	8,5
Сизаль	80—840	9—22	2—14	115	10—22	1300—1500	11
Банан	529—914	27—32	1—3	—	11—12	1300—1350	—
Койр	106—175	9	15—40	64	39—49	1150—1250	13
Абака	12	41	3,4	257	—	1500	14
Ананас	413—1627	60—82	0—1,6	—	6—14	1440—1560	—
Пальма	248	3,2	2,5	—	—	700	—
Лист фи- никовой пальмы	309	11	2,7	—	—	900	—
Финиковая пальма	377	2,7	13	—	—	1000	—
Лист ананаса	126	4,4	2,2	—	—	1400	—

ханическую прочность композитов. Следовательно, перед изготовлением композита необходим правильный выбор натуральных волокон [1, 18].

Доступно огромное количество материалов, из которых получают натуральные волокна [33]. Однако в настоящее время лишь часть из них используют в промышленных, бытовых и академических целях. Механические свойства натуральных волокон зависят от типа почвы произрастания, окружающей среды, климатических условий, температуры, методов обработки, используемых для извлечения волокон, их химической обработки и т. д. Механические свойства некоторых натуральных волокон приведены в табл. 2.

Композиты на основе банановых волокон обладают хорошими механическими свойствами благодаря высокому модулю упругости  $E$ , малому удлинению при разрыве и низкой плотности  $\rho$  [35].

В табл. 3 перечислены обзоры исследований КАНВ и их производных, выполненные за 21 год.

**1.2. Выбор натуральных волокон.** Конечные свойства КАНВ зависят от свойств выбранных волокон. Натуральные волокна поглощают влагу (см. табл. 2) [1, 36, 37], что влияет на их прочность при растяжении  $\sigma^{\text{tu}}$ . В силу наличия наноструктур внутри волокон в одиночной пряди образуются небольшие капилляры, работающие как микровсасывающие насосы и как накопители влаги. Поэтому необходимо тщательно анализи-

## Обзор исследований натуральных волокон

Ссылка	Год	Прочность при изгибе	Прочность при растяжении	Модуль при растяжении	Прочность при ударе	Долговечность	Влагосодержание/ поглощение	Метод изготовления	Физическая модификация	Химическая обработка	Огнестойкость	Приложение
[30]	1999		X	X			X	X	X	X		
[31]	2001	X	X						X	X		
[32]	2006							X				X
[33]	2007						X			X		
[34]	2008		X					X			X	
[35]	2008						X			X		
[36]	2012		X	X		X	X	X	X	X	X	
[28]	2012						X			X		
[37]	2013		X	X								X
[38]	2014		X	X	X	X			X			X
[39]	2015							X	X	X		X
[40]	2015						X			X		X
[41]	2016	X	X	X								X
[42]	2017		X		X							
[43]	2017							X				X
[44]	2018	X	X	X	X		X					
[45]	2018	X	X	X				X				
[46]	2019		X		X							
[47]	2020					X	X			X		
[48]	2020	X	X					X	X	X	X	X
[49]	2020									X	X	X

ровать влагопоглощающую способность натуральных волокон при работе в очень влажной среде [38—40]. Для электромобилей требуется множество экологически чистых изоляционных материалов; они менее подвержены воздействию высоких температур, чем автомобили с двигателями, используемыми в качестве топлива бензин, выделяющий  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и другие вредные газы [22, 41]. Разные виды химической обработки волокон способны изменить в них содержание влаги  $W$  и сделать их менее гидрофильными [42, 43].

Расположение волокон в матрице композитов называют их ориентацией. Существует пять типов ориентации волокон, используемых при создании композита — однонаправленная, двунаправленная, тканая, слу-



Рис. 3. Типы ориентации волокон.

чайная, частично ориентированная (рис. 3.) Тканая ориентация волокон в большинстве случаев обуславливает большую прочность композита [3, 44—47].

Ориентация волокон определяет конечную прочность и жесткость КАНВ [48]. Тканая ориентация более сложна с точки зрения времени изготовления, чем двунаправленная [49]. В случае двунаправленной ориентации волокна могут быть перпендикулярны друг другу или наклонены под некоторым углом [50].

Для создания наиболее подходящего композита сначала надо сформулировать проблему и выполнить проектирование с использованием соответствующих методов оптимизации и инженерных уравнений [22, 51]. Свойства большинства натуральных волокон еще предстоит определить, поскольку данных о них нельзя найти в литературе. Поэтому необходимы аналитические модели, позволяющие выяснить, соответствует ли выбранное натуральное волокно желаемым характеристикам КАНВ [23].

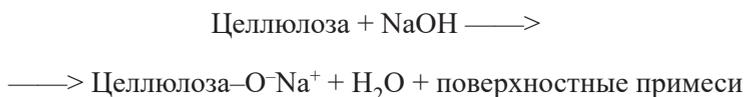
Из данных табл. 1 видно, что высокое содержание целлюлозы или небольшое количество лигнина и гемицеллюлозы в растительном волокне приводит к его высокой гидрофильности. Влажность волокон изменяет форму и размер КАНВ и ослабляет сцепление матрицы с волокнами [52]. Поэтому для правильного выбора натурального волокна необходимо провести оптимизацию с целью определения надлежащего количества целлюлозы и влагопоглощающей способности. Географическое местоположение также влияет на выбор волокон. В Индии наиболее распространены растительные волокна из бамбука, банана, абаки, арека, кокоса, конопли, рами, сизаля, кенафа, джута и т. д. В Непале и Бутане оптом изготавливают волокна из конопли и крапивы. В холодных странах в большом количестве доступны льняные волокна. США, страны Восточной Европы и Восточной Азии — наиболее крупные производители хлопковых волокон [14, 53].

Используя данные табл. 2, можно выбрать подходящие волокна на основе свойств, необходимых для создания КАНВ. При выборе волокон в некоторых областях применения следует учитывать их удельную прочность, удельный модуль Юнга, а также содержание влаги [22, 37, 41].

**1.3. Выбор химической обработки натуральных волокон.** Для улучшения свойств натуральных волокон необходима химическая обработка:

алкилирование, альдегидирование, силанизация, акрирование, перманганизация, бензолизация, малеинизация связующих агентов, изоцианирование, виниловая прививка, отбеливание, депарафинизация и т. д. [23, 38, 39, 54—56]. Необработанные КАНВ обладают очень низкой прочностью [54, 57]. Наличие натурального воска на волокнах увеличивает поверхностное натяжение, не позволяя материалу матрицы должным образом контактировать с поверхностью волокна. В натуральных волокнах гидроксильные группы и свободная вода присутствуют в основном в аморфной области, что ослабляет способность волокон создавать надлежащее адгезионное сцепление с большинством материалов матрицы и смолами. Более высокое поглощение влаги натуральными волокнами приводит к набуханию, плохой размеростабильности, пластификации и плохим механическим свойствам [58].

Щелочная химическая обработка — наиболее широко применяемая обработка натуральных волокон при использовании термореактивных и термопластичных смол [38]. Она также известна как мерсеризация. При этой обработке масло и воск, покрывающие поверхность стенки натуральных волокон, вымываются с удалением определенного количества лигнина и деполимеризацией целлюлозы, обнажая более короткие кристаллиты. Гидроксид натрия (щелочной) реагирует с натуральными волокнами следующим образом [59]:



На рис. 4 схематически показано, что после щелочной обработки определенное количество лигнина превращается в воду и соединение натриевой соли с длинной углеродной цепью, как следует из приведен-

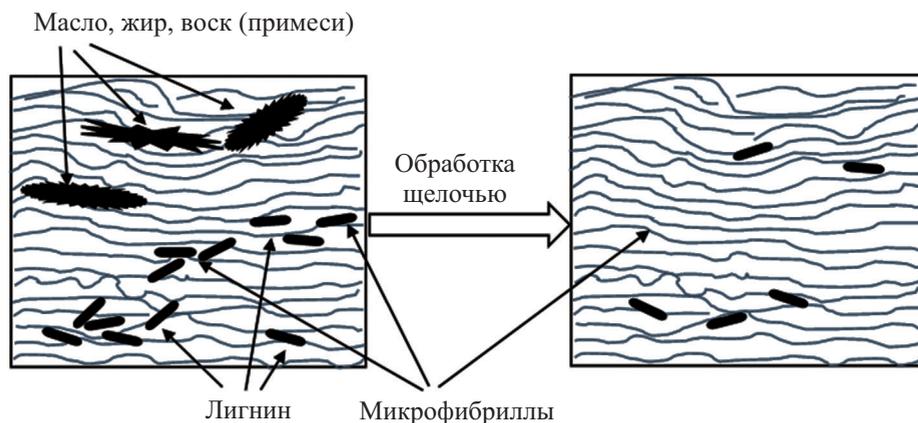


Рис. 4. Схема, иллюстрирующая влияние щелочной обработки поверхности натуральных волокон.

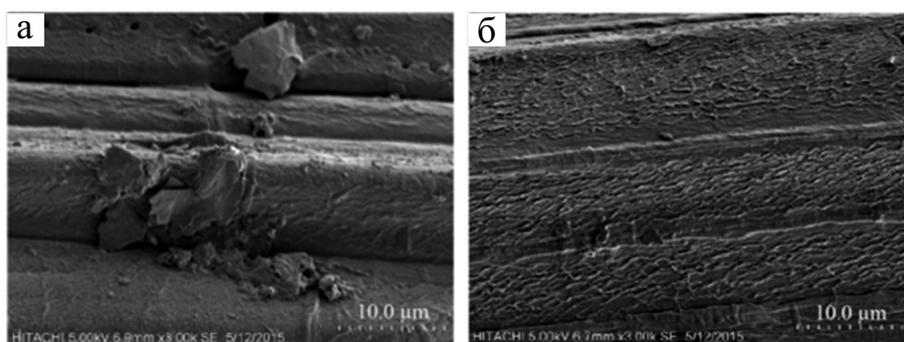
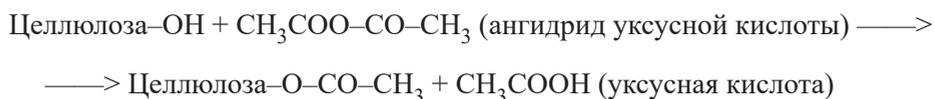


Рис. 5. Микрофотографии СЭМ необработанных (а) и обработанных щелочью NaOH (б) волокон кенафа [60].

ного уравнения. Также удаляются все масляные и восковые примеси. При удалении лигнина и гемицеллюлозы возникают пустоты, делающие волокно менее плотным и менее жестким. Поэтому при приложении растягивающей нагрузки микрофибриллы получают пространство для перегруппировки в направлении деформирования [59].

При щелочной обработке натуральных волокон наблюдают значительное улучшение удельной прочности и прочности при растяжении [45, 54, 61—70]. На рис. 5 приведены микрофотографии (СЭМ) волокон кенафа с обработанными щелочью (NaOH) и необработанными поверхностями, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ). Видно, что такая обработка удаляет большую часть влаги и обнажает микрофибриллы, так что между волокном и материалом матрицы может иметь место надлежащее сцепление [60]. Однако длительная обработка волокон может ухудшить их механическую прочность и сцепление волокон с матрицей [71].

Ацетилирование — обработка натуральных волокон уксусной кислотой и уксусным ангидридом [72]. Ранее этот метод использовали для текстильных композитов, но теперь он становится популярным и для натуральных волокон [34]. Он улучшает размеростабильность, биологическую стойкость и уменьшает влагопоглощение КАНВ. Натуральное волокно состоит из большого количества лигноцеллюлозы, играющей важную роль в ходе ацетилирования, реагируя с уксусным ангидридом и приводя к этерификации гидроксильных групп в стенке клетки с образованием уксусной кислоты в качестве побочного продукта, как показано на схеме [73]



Для осуществления указанной реакции используют ограниченное количество жидкого уксусного ангидрида без катализатора или соразтворителя, а для начала реакции — обычно высокие температуры от 120 до 160 °С [23,

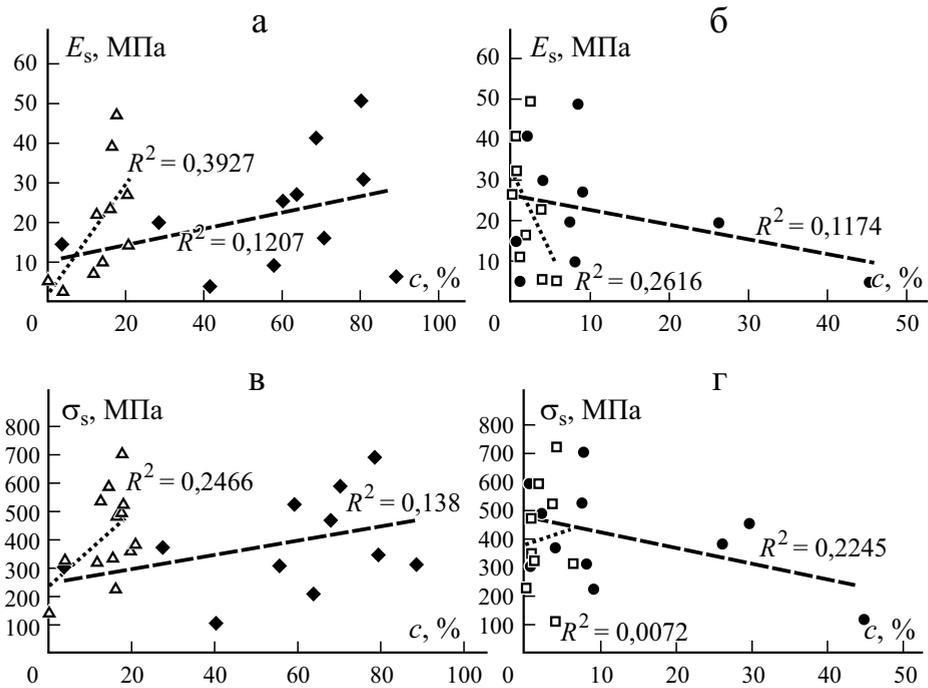


Рис. 6. Влияние химических составляющих волокон  $c$  на механические свойства композитов: зависимости удельного модуля  $E_s$  (а, б) и удельной прочности  $\sigma_s$  (в, г) от содержания целлюлозы (♦, - - -), гемицеллюлозы (Δ, ···), лигнина (●, - · -), пектина (□, ····). (- - -, ····) — линейный регрессионный анализ [82].

38, 74]. При ацетиловании наблюдают улучшение удельной прочности и гидрофильности натурального волокна [75—80].

Химическая обработка волокон удаляет такие химические составляющие, как лигнин, целлюлоза, пектин, гемицеллюлоза, воск и т. д. [81], способные изменить их механические свойства (рис. 6). Кроме того, удаление составляющих выполняли с целью получения более легких высокопрочных волокон. Виден разный наклон линий регрессии для разных химических составляющих натурального волокна. Высокое содержание целлюлозы и гемицеллюлозы увеличивает удельную прочность и удельный модуль Юнга, а также делает волокно объемным [82]. Присутствие лигнина ослабляет волокно, а его удаление увеличивает удельную прочность и удельный модуль Юнга. Наличие пектина снижает удельный модуль Юнга, но увеличивает удельную прочность. Таким образом, следует удалять оптимальное количество пектина.

Химическая формула силана —  $\text{SiH}_4$ . Минерализация придает стабильность композиту и действует как связующий агент [83], образуя мостики между поверхностью волокон и матрицей. В процессе конденсации один конец силанольного радикала создает связь с гидроксильной группой целлюлозы, а другой — с функциональной группой матрицы [38, 84]. Таким

образом, поперечные связи между полимерной матрицей и волокнами образуются с однородной молекулярной углеводородной цепью, удерживающей волокно вместе с материалом матрицы при приложении нагрузки. Обработка силаном значительно увеличивает удельную прочность композитов из натуральных волокон [85—89].

Обработка бензоилированием включает использование бензоилхлорида для снижения гидрофильности натуральных волокон, что значительно улучшает термостабильность и межфазную адгезию поверхности волокна и матрицей [90—92]. Методом экстракции масло, воск, лигнин и гемицеллюлозу удаляют с поверхности волокна и гидроксильная группа, содержащая целлюлозу, обнажается [45]. В процессе бензоилирования гидроксильная группа заменяется бензоильной группой, но гидроксильная группа присоединяется к основной цепи целлюлозы [38].

Обработка натуральных волокон хлоритом натрия  $\text{NaClO}_2$  в кислотной ванне отбеливает волокна и удаляет из них большую часть влаги. При этом их гидрофильность существенно снижается, а гибкость увеличивается [93—96].

Обработку изоцианатом используют для образования за счет химической реакции прочной ковалентной связи между волокнами и материалом матрицы. При такой обработке содержание влаги уменьшается, а гидрофобность возрастает [97—99]. Изоцианатная функциональная группа ( $-\text{N}=\text{C}=\text{O}$ ) реагирует с гидроксильной группой, присутствующей в целлюлозе и лигнине волокна, и образует ковалентную связь между волокном и матрицей.

При обработке хлорангидридом олеиновой кислоты, являющейся производной жирной кислоты, он реагирует с гидроксильной группой целлюлозы, присутствующей в волокне, улучшая адгезию волокон к материалу матрицы и уменьшая в них содержание влаги [34, 100, 101].

Обработка грибами — новый биологический метод, в настоящее время используемый для улучшения сцепления волокон с матрицей [102]. При такой обработке на волокно наносят специальные биологические ферменты для удаления с его поверхности нецеллюлозного вещества [34, 103]. Обработка обеспечивает улучшенные механические и физические свойства [103].

Обработку натурального волокна пероксидом осуществляют с помощью пероксидной прививки полиэтилена, сцепленного с поверхностью волокна, где свободные пероксидные радикалы реагируют с гидроксильной группой волокна и матрицы [104, 105]. Этот метод увеличивает гидрофобную природу волокна, снижает содержание влаги, улучшает сцепление на поверхности раздела волокно—матрица и увеличивает термостабильность натуральных волокон [106, 107].

Малеинированные связующие агенты взаимодействуют с поверхностями волокна и матрицы, имеющими функциональные группы, образуя углеродные связи волокон с матрицей [108, 109]. В такой обработке малеиновый ангидрид используют для образования покрытия на поверхности во-

локна с длинноцепным полимером путем взаимодействия с гидроксильной группой аморфной области лигнина в целлюлозной сети. Образовавшееся покрытие уменьшает взаимодействие гидроксильной группы с волокном и в итоге снижает гидрофильную способность волокон [110—112].

Акрилирование акрилонитрилом происходит за счет реакции акриловой кислоты ( $\text{CH}_2=\text{CHCOOH}$ ) с гидроксильной группой целлюлозы внутри волокна, стабилизирующей полимеризацию целлюлозы [38, 113]. Связь кислород—кислород создается путем удаления атома водорода из полимерной цепи, когда пероксидные радикалы инициируют прививку акриловой кислоты в матрице. С помощью этого метода на поверхности раздела волокно—матрица улучшается сцепление и способность передачи напряжений [114—116].

При обработке волокон стеариновой кислотой  $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{CO}_2\text{H}$ , карбоксильные группы которой реагируют с гидроксильной группой волокна, возрастает кристалличность структуры волокна [117—119]. Карбоксильную группу получают из раствора этилового спирта. Микрофибриллы подвергаются воздействию материала матрицы, сцепляя их вместе; контакт между волокнами и материалом матрицы увеличивается [120, 121].

Обработка перманганатом калия  $\text{KMnO}_4$  улучшает химическую связь волокон с матрицей, обеспечивая стабильность КАНВ [122]. Перманганат калия реагирует с гидроксильной группой целлюлозы и лигнином в волокне, улучшая термостабильность КАНВ [123]. Гидрофобная способность КАНВ возрастает, обеспечивая им дополнительный защитный слой [124].

Обработка композитного материала триазином  $\text{C}_3\text{H}_3\text{N}_3$  увеличивает сцепление волокон с матрицей за счет увеличения их ковалентной связи и повышения устойчивости волокон к воздействию влаги [125]. Триазин реагирует с гидроксильной группой целлюлозы, присутствующей в волокнах, делая ее более гидрофобной. Таким образом, удаление функциональной группы целлюлозы и лигнина из волокна позволяет материалу матрицы образовывать более прочные ковалентные связи с волокнами и повышать адгезию матрицы с волокнами [126].

**1.4. Дисперсия и ориентация волокон.** Дисперсия волокон оказывает значительное влияние на свойства КАНВ, обычно имеющих гидрофильные волокна и гидрофобную матрицу. Ориентация волокон определяет удельную прочность, механические свойства и размеростабильность КАНВ [45, 54, 79]. Разные виды химической обработки в разной степени улучшают дисперсию волокон, оказывая существенное влияние на их межповерхностное сцепление. Дисперсия волокон влияет на межповерхностное сцепление волокон с матрицей благодаря изменению количества пустот [127]. На дисперсию волокон также влияют температура, давление и химические вещества. Для изменения ориентации волокон можно также использовать метод прививки, но его основной недостаток — большая стоимость. Наилучших результатов достигают при ориентировании волокон путем приложения механических нагрузок [128, 129].

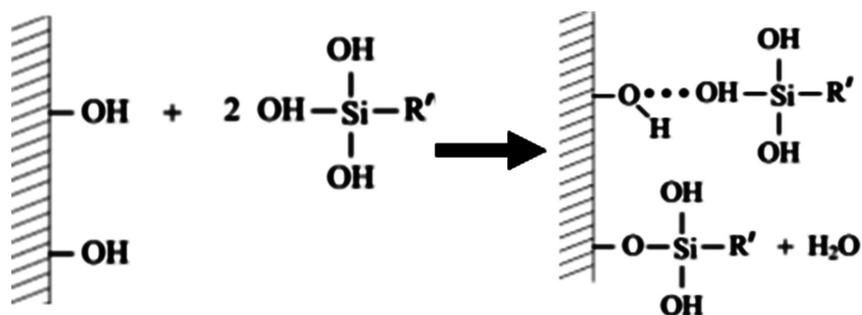


Рис. 7. Дисперсия волокна [130].

Механизм диспергирования волокон показан на рис. 7 [130], где функциональная группа, содержащая кремний с углеводородной группой и три гидроксильные группы в четырех местах сцепления, образует связь с кислородом в гидроксильной группе целлюлозы волокна, заменяя гидроксильную группу с функциональной группой кремния и образуя воду.

Обработка КАНВ во время изготовления напрямую влияет на дисперсию волокон в матрице. Использование двухшнековых экструдеров вместо одношнековых в высокоинтенсивном процессе перемешивания обеспечивает лучшее диспергирование волокон и уменьшает общие затраты.

Наибольшей прочности обычно достигают, когда волокна ориентированы в направлении нагружения. Осуществить укладку натуральных волокон сложнее, чем синтетических. Часть волокон ориентируется под углом к направлению нагружения, что улучшает свойства композита в двух направлениях — продольном и поперечном. Тканые структуры или плотняное переплетение также влияют на общую прочность композитных материалов.

**1.5. Выбор матрицы.** Матрицу выбирают исходя из желаемых свойств КАНВ, поскольку разные материалы матрицы имеют разные характеристики сцепления. Биоразлагаемость материала матрицы — еще один критерий выбора; для полностью биоразлагаемых КАНВ требуется 100% биоразлагаемая матрица, не производящая вредных газов.

Полимерные матрицы, используемые для изготовления КАНВ, делят на две группы — полностью разлагаемые и частично разлагаемые. Полностью разлагаемые матрицы получают из органических источников и подразделяют на натуральные и на масляной основе. Натуральные матрицы включают полимолочную кислоту, термопластичный крахмал, полигидроксиалканоат и т. д. Матрица на масляной основе включает алифатический полиэфир, сложноэфирный амид и т. д. Частично разлагаемая матрица включает полиэфир, полиэтилен, полипропилен, поливиниловый спирт и т. д.

Смолы делят на нефтехимические термопластичные и терморективные. Эпоксидная смола (ЭС) представляет собой нефтехимическую терморективную смолу, обладающую высоким термическим сопротивлением, огнеупорностью и размеростабильностью даже при повышенных температурах. Смолы на нефтехимической основе, широко

используемые в качестве матрицы для композитов, частично разлагаются; механические свойства этих матриц лучше, чем полимерной матрицы. Матрица — основной материал, воспринимающий нагрузку, передающий ее волокнам и защищающий их от агрессивных условий окружающей среды. Для изготовления КАНВ обычно предпочитают использовать легкую полимерную матрицу.

**1.6. Методы обработки композитов на основе натуральных волокон.** Существуют разные методы обработки натуральных волокон, зависящие от их исходных свойств: содержания влаги, прочности, температуры и т. д. Основная задача — извлечение волокон из растения. Наиболее распространенные методы — вымачивание росой или водой, механическая экстракция и химическая обработка. Вымачивание росой или водой обычно занимает от 14 до 28 дней для отделения лигнина, гемицеллюлозы, пектина, воска и т.д. в ходе деградации волокон. Механическая обработка — быстрый метод. И хотя при этом методе волокна теряют некоторую долю прочности, его все же широко используют.

Температура, объемное содержание и тип волокон, степень влажности и гидрофильности — основные характеристики, от которых зависит обработка натуральных волокон. Если количество присутствующей влаги выше порогового уровня, предварительная обработка должна удалить ее [131]. Для большинства натуральных волокон температура обработки во избежание их разрушения и усадки должна составлять около 200 °С [132]. Большая температура может ухудшить характеристики КАНВ в силу изменений механических и физических свойств материалов волокна и матрицы [133]. Основные производственные технологии для изготовления КАНВ — формование под давлением, литьем, экструдированием, ручная выкладка и формование с переносом смолы и др.

*1.6.1. Формование под давлением* с 1990-х годов широко используют для изготовления облегченных материалов, обладающих хорошими характеристиками и высокой прочностью [135]. В этом методе сырье предварительно нагревают, помещают в пресс-форму и формируют, создав в ней

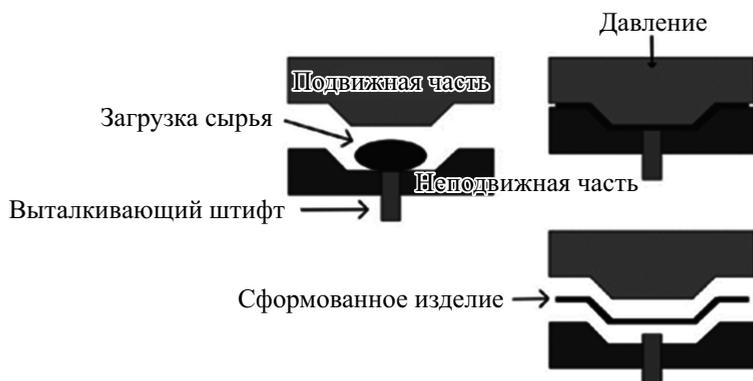


Рис. 8. Изготовление композитов методом формования под давлением [134].

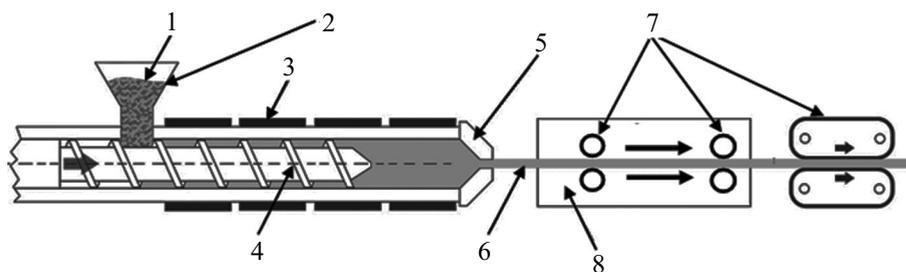


Рис. 9. Изготовление композитов методом экструзии: 1 — гранулы сырья; 2 — дозатор; 3 — нагревающие элементы; 4 — червяк; 5 — фильера; 6 — композитный материал; 7 — эскалаторы; 8 — охлаждающая камера.

высокое давление [136, 137]. Давление поддерживают до отверждения композита. Количество материала, время нагревания, величина приложенного давления, время и метод охлаждения — критические параметры, которые необходимо учитывать при формовании под давлением. На рис. 8 показана схема и технологическая диаграмма метода формования под давлением для изготовления композитного материала, в котором подвижную часть пресс-формы используют для приложения давления, а выталкивающий штифт способствует извлечению конечного продукта после отверждения.

1.6.2. *Формование экструдированием* — один из простых производственных процессов, наиболее широко используемых для изготовления КАНВ с высокой прочностью и жесткостью [138]. Термопластичный материал подают в бункер в виде гранул или окатышей и доставляют в цилиндр экструдера, имеющий нагревательное устройство с контролем температуры. В [139] методом экструзии изготовили композит на основе волокон сахарного тростника и матрицы из полиэтилена высокой плотности, прочность при растяжении которого была на 50% больше, чем изготовленного традиционным методом. Типичное устройство для формования экструзией показано на рис. 9.

1.6.3. *Литьевое формование*. В этом методе гранулы или окатыши полимера загружают в бункер, направляющий их во встроенную нагревательную камеру (или печь), температуру которой контролируют и поддерживают на уровне точки плавления используемого полимера [141]. Таким образом, расплавленный полимер доставляют в насосную секцию, из которой материал впрыскивают в разъемную пресс-форму, обычно расположенную рядом с этой секцией. Расплавленные материалы охлаждают внутри пресс-формы и извлекают после отверждения. Данный метод широко используют для массового изготовления композитных материалов. На рис. 10 показан типичный процесс литьевого формования и архитектура машины, используемой в промышленности для производства объемных изделий определенной формы.

1.6.4. *Ручная выкладка* — дешевый метод, наиболее широко применяемый для изготовления КАНВ, в котором используют открытую пресс-форму с нанесенным на ее поверхность тонким слоем антиадгезива. Волокна

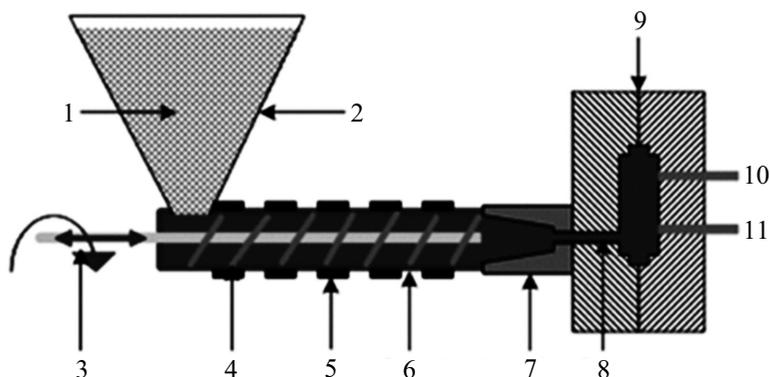


Рис. 10. Метод литьевого формования [140]: 1 — гранулят; 2 — дозатор; 3 — движение червяка; 4 — червяк; 5 — нагреватели; 6 — цилиндр; 7 — сопло; 8 — литник; 9 — разъемная пресс-форма; 10 — выталкиватель; 11 — штифты.

укладывают на поверхность пресс-формы и с помощью кисти или валика наносят на них матрицу или смолу так, чтобы внутри композитного материала не осталось воздуха, а смола равномерно распределилась на волокнах. Затем выкладывают новый слой волокон и процесс повторяют до получения требуемой толщины композита. На рис. 11 схематически показаны инструменты для ручной выкладки и необходимые материалы. Чистка щеткой и прокатка очень важны для удаления воздуха из композитного материала и получения однородного распределения смолы. Изготовленные слои или ламинаты в течение определенного времени оставляют нетронутыми до их отверждения, а затем извлекают композит из пресс-формы.

*1.6.5. Формование с переносом смолы (RTM).* В этом методе волокна размещают внутри полости пресс-формы, которую закрывают зажимами и под давлением инжектируют в нее смолу при определенной температуре [142]. Температуру контролируют с помощью компьютера или термопар непосредственно на цифровом дисплее. RTM — промежуточный способ

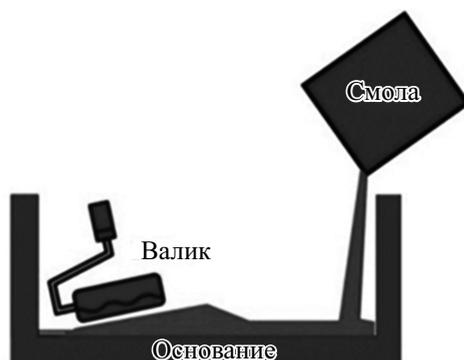


Рис. 11. Изготовление композита методом ручной выкладки [134].

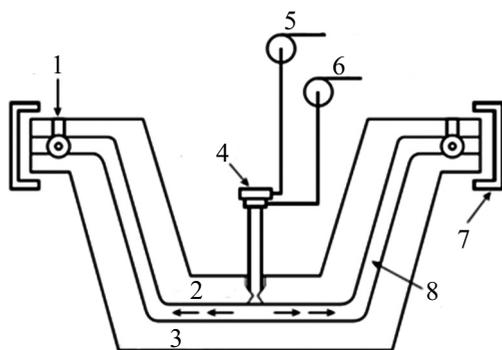


Рис. 12. Метод формования с переносом смолы (RTM) [143]: 1 — вентиляционное отверстие; 2, 3 — верхняя и нижняя части пресс-формы; 4 — смеситель/держатель инжектора; 5 — дозатор смолы; 6 — дозатор катализатора; 7 — захват; 8 — сухая арматура.

изготовления изделий средних и крупных размеров из КАНВ. Для обеспечения легкого затекания и распределения смолы, а также для сокращения времени производственного цикла можно использовать вакуумирование.

Изготовленное изделие имеет две готовые поверхности. На рис. 12 показан типичный процесс формования с переносом смолы с использованием двух пресс-форм с вентиляционным отверстием для облегчения течения смолы.

1.6.6. *Формование методом инфузии (RIM) и вакуумной инфузии (VARIM).* Способ формования инфузией смолы аналогичен формованию RTM с той лишь разницей, что вторую поверхность пресс-формы заменяют гибкой мембраной или поверхностью. Вакуумирование помогает устранить воздушные карманы и обеспечивает течение смолы внутри формовочной полости. Гибкую поверхность удаляют и прикрепляют к неподвижной

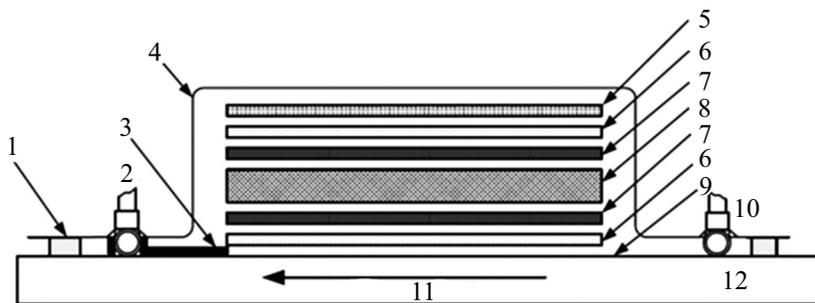


Рис. 13. Формование методом вакуумной инфузии смолы (VARIM) [144]: 1 — герметизирующая лента; 2 — вакуум; 3 — вентиль; 4 — вакуумный мешок; 5 — среда распределения смолы; 6 — антиадгезионная пленка; 7 — разделительная ткань; 8 — ткань; 9 — жидкий разделительный агент; 10 — смола; 11 — направление течения смолы; 12 — нагревательный стол.

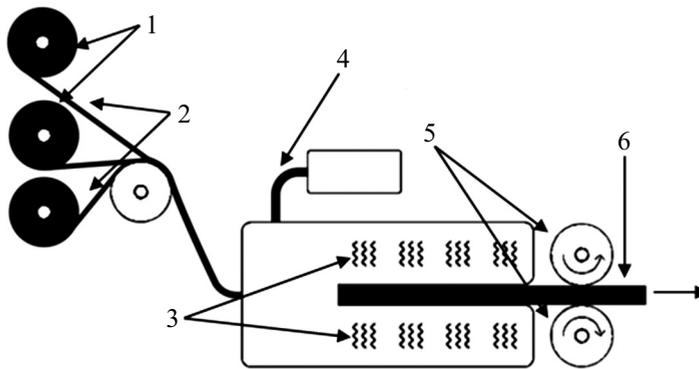


Рис. 14. Изготовление композитов с натуральными волокнами методом пултрुзии: 1 — катушки с прядями волокон; 2 — волокна; 3 — нагреватели; 4 — смола; 5 — эскалаторы с охлаждающей жидкостью; 6 — готовое изделие.

поверхности полости, а волокна помещают внутрь формовочной полости [144]. Затем внутри полости с помощью всасывающего устройства создают вакуум. При этом смола перетекает из камеры в соединенную с ней полость с помещенными в неё волокнами. На рис. 13 показана схема VARIM. Смолу можно нагнетать с помощью вакуума или под умеренным давлением для обеспечения ее правильного распределения. Затем материал отверждают до достижения адекватного склеивания.

*1.6.7. Процесс пултрузии* означает вытягивание + экструзия. Это непрерывный процесс изготовления полимерных КАНВ (рис. 14). Пучки волокон имеют вид нитей, матов и т. д. В качестве материалов матрицы можно использовать термореактивные или термопластичные материалы. Это обуславливает гибкость процесса при изготовлении разных КАНВ. Волокна из рулонов затягивают с помощью эскалаторов или тянущих механизмов внутрь нагревательной камеры, в которую смолу или полимер подают с помощью инжектора или винтового механизма. В нагревательной камере поддерживают температуру отверждения смолы или температуру плавления полимера. Волокна пропитывают смолой или полимером, а затем композитный материал вытягивают из камеры через стальную фильеру, формирующую требуемую геометрию изделия. Эскалаторы снабжены жидкостью, охлаждающей композит до получения готового изделия. Изделие, изготовленное методом пултрузии, в силу большого содержания волокон обладает большой конструкционной прочностью [145]. Процесс можно сделать полностью автоматизированным, что снизит затраты на рабочую силу и производство. Этот процесс, имеющий короткий производственный цикл, используют в разных отраслях промышленности [146].

*1.6.8. Метод автоклава.* В этом методе волокна, пропитанные смолой, помещают в открытую пресс-форму, имеющую форму изготавливаемого изделия [147]. Сначала форму покрывают тонкой полиэфирной тканью, а затем пористой пленкой и дышащей тканью [148]. Иногда на заготовку

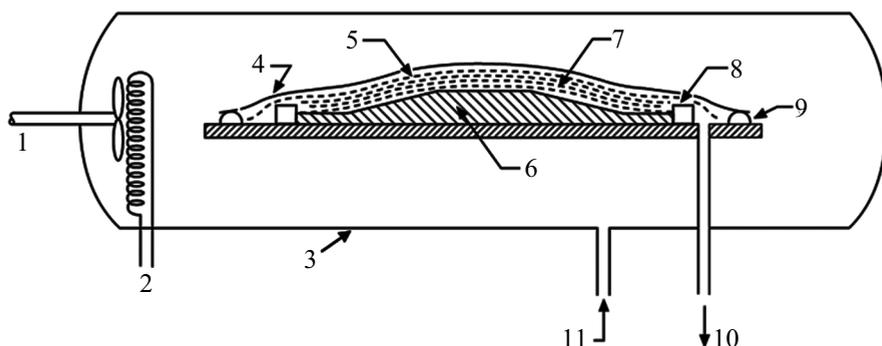


Рис. 15. Метод автоклава [148]: 1 — фен; 2 — нагреватели; 3 — автоклав; 4 — мембрана; 5 — дышащий пакет; 6 — пресс-форма; 7 — пакет препрега; 8 — пробковая дамба; 9 — изоляционный слой; 10 — вакуум; 11 — давление.

слоистого композита также кладут препрег, а затем другие необходимые пленки (рис. 15). Высокопрочная мембрана поддерживает все остальные ткани и помогает создавать надлежащий вакуум. Для осуществления последующего формования изделия необходима хорошая герметизация, для обеспечения которой в мембране и формовочной поверхности используют съемные уплотнения, обеспечивающие воздухонепроницаемость. Затем с помощью мощного всасывающего устройства создают вакуум. Всю сборку помещают в автоклав, где внешнее давление регулируют с помощью компрессора. Температуру также регулируют либо с помощью нагревательной спирали, встроенной непосредственно под пресс-форму, либо с помощью теплообменника (рис. 15). Для удаления любой нежелательной воздушной полости внутри изготавливаемого слоистого композита вне пресс-формы создают большее давление. Автоклавный процесс медленный и дорогостоящий. Его широко используют в авиакосмической промышленности для изготовления высокопрочных изделий с высокой долговечностью [149].

*1.6.9. Реакционное формование армированного материала (RRIM).* В этом процессе используют пресс-форму с двумя съемными частями. Как показано на рис. 16, пресс-форма имеет два впускных отверстия для химикатов, вводимых под высоким давлением с помощью мощного механизма форсунки, такого как гидравлический насос высокого давления или механизм с поршневым цилиндром. Эти две отдельные камеры спроектированы таким образом, чтобы получать необходимое количество обоих химикатов (реактивных смол) в требуемой пропорции, контролируемой дозирующими устройствами на входах [150]. Внутри смешивательной камеры потоки химикатов смешиваются, начинается химическая реакция между ними, а затем смесь поступает в полость формования, в которую уже помещены армирующие волокна в виде заготовки слоистого композита. Процесс пропитки заготовки начинается, как только смесь достигает поло-

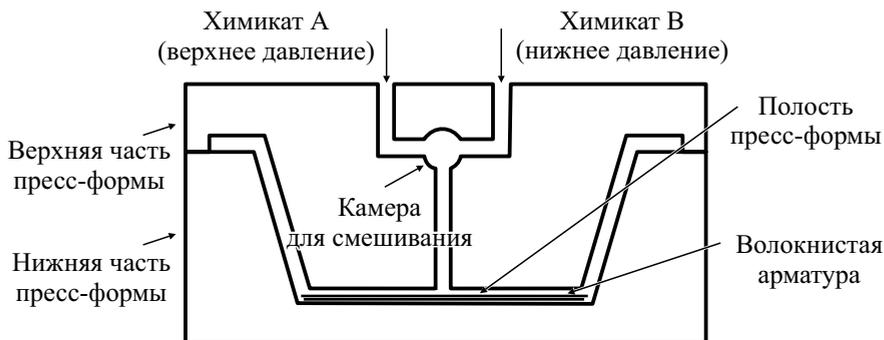


Рис. 16. Упрощенная схема метода реактивного литья под давлением армированного материала.

сти. Температуру полости формы поддерживают на уровне температуры отверждения смолы, образованной реакцией двух химикатов, например, А и В. После отверждения подачу химикатов прекращают и удаляют верхнюю пресс-форму, конечный продукт вынимают из нижней пресс-формы. Этот процесс успешно разработан для нейлона, полиуретана и полиэфиров. Использование в этом методе двухкомпонентного полиуретана очень популярно. Детали, изготовленные данным методом, обладают хорошей конструкционной прочностью [148].

## 2. Свойства КАНВ

Свойства КАНВ во многом зависят от сцепления волокон с матрицей и определяют долговечность и стабильность композитного материала [151].

**2.1. Механические свойства. 2.1.1. Растяжение.** Свойства при растяжении — наиболее важная характеристика натуральных волокон. Для определения прочности натуральных волокон при растяжении при разных температурах, влажности и предшествующих химических обработках используют стандарты ASTM. Общая прочность КАНВ при растяжении зависит от межповерхностной адгезии волокон с материалом матрицы. На прочность при растяжении также влияет химическая обработка, проводимая для модификации волокна (рис. 17) [152]. Видно, что добавление 5% по массе щелочи к льняным волокнам увеличивает их прочность при растяжении и модуль упругости [152].

В исходном состоянии натуральные волокна обладают некоторой прочностью при растяжении, которую можно увеличить с помощью разных химических методов [76]. В [153] для определения механического поведения композитов, армированных джутом и кокосовым волокном, выполнили анализ методом конечных элементов и подтвердили результаты экспериментами.

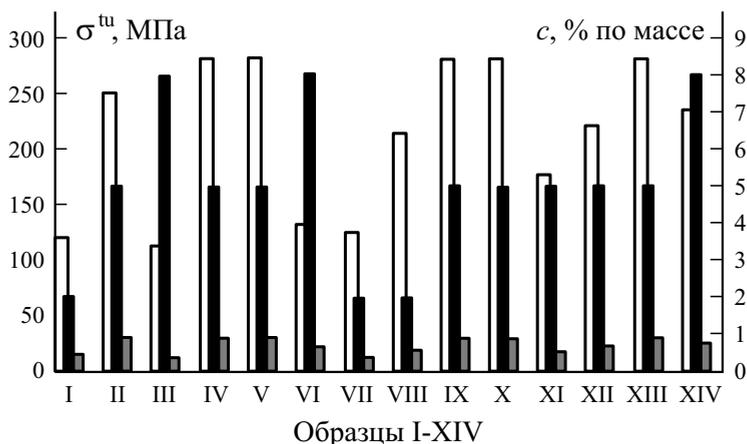


Рис. 17. Влияние щелочной обработки  $c$  (■) на прочность  $\sigma^{tu}$  (□) и модуль упругости  $E_t$  (▨) при растяжении льняных волокон [152].

В табл. 2 приведены механические свойства некоторых натуральных волокон, широко используемых для изготовления КАНВ. Прочность при растяжении разных натуральных волокон различается в силу разного внутреннего расположения лигнина и целлюлозы внутри волокон и угла наклона микрофибрилл.

2.1.2. Сжатие. Прочность при сжатии  $\sigma^{cu}$  КАНВ зависит от ориентации волокон в матрице, плотности матрицы и волокон и их распределения [84, 154]. При приложении сжимающей нагрузки матрица КАНВ воспринимает ее и передает волокнам [155]. В [156] экспериментально изучили сжимающие свойства композитов на основе пучков льняных волокон и эпоксидной матрицы и установили, что прочность волокон меньше прочности композитного образца такого же размера. В [157] методом литья под давлением изготовили композит гидроксиапатит—полиэфирэфиркетон, изучили его механические свойства и установили, что 20% по объему гидроксиапатита обеспечили среднюю прочность при сжатии 139 МПа с числом твердости по Виккерсу 23,82.

2.1.3. Удар. Ударная прочность КАНВ определяет его сопротивление ударным нагрузкам. Такие нагрузки прикладывают с очень высокой скоростью, время их действия мало, а величина высока. Поэтому ударную прочность КАНВ следует определить перед его использованием в приложении, в котором ожидают ударные нагрузки [158]. Обычно ударная прочность КАНВ хорошая, поскольку натуральные волокна достаточно гибкие, а материал матрицы — полимер, способный выдерживать такие нагрузки [8, 144]. Продолжительность удара короткая, поэтому большую часть нагрузки принимает на себя матрица, т.е. прочность матрицы также влияет на общую ударную прочность КАНВ. В [159] экспериментально изучили композит на основе кокосовых волокон и эпоксидной матрицы и установили, что его ударная прочность 11,49 кДж/м<sup>2</sup>. Причина такого

Табл. 4

Прочность при изгибе  $\sigma^{bu}$  и растяжении  $\sigma^{tu}$  композитов из натуральных волокон, подвергнутых химической обработке

Волокно	Содержание, % по массе	Вид обработки	$\sigma^{bu}$ , МПа	$\sigma^{tu}$ , МПа	Источник
Бамбук	16	—	42,27	13,85	[164]
Джут	20	NaOH	129,5	67,41	[165]
Лен	15	NaHCO <sub>3</sub>	69,29	39,72	[165]
Сизаль	15	NaOH	63,73	22,03	[165]
Конопля	40	NaOH	112,79	54,60	[166]
Кенаф	20	—	33,28	38,30	[167]
Абака	50	Хлорид бензол- диазония	82,76	75,34	[168]
Лист ананаса	42	—	239,37	71,66	[169]
Пальма	30	NaOH+ соль бен- золдиазония	55,17	24,69	[170]

низкого значения — плохое межповерхностное сцепление волокон с матрицей. В [160] экспериментально изучили гибридный композит с эпоксидной матрицей, армированной джутовыми и банановыми волокнами, и получили максимальную ударную прочность 18,23 кДж/м<sup>2</sup> при массовом соотношении джутовых и банановых волокон 50/50.

**2.1.4. Изгиб.** Прочность при изгибе КАНВ также довольно высока. Предельная изгибающая нагрузка — это прочность КАНВ при изгибе, при превышении которой композит разрушается [161]. Эта прочность зависит от прочности сцепления волокон с матрицей. На общую прочность КАНВ при изгибе в основном влияет прочность материала матрицы [162]. В табл. 4 приведены изгибные свойства некоторых распространенных КАНВ. Видно, что на эти свойства также влияет химическая обработка волокон в зависимости от концентрации используемого химического вещества. В [163] экспериментально проанализировали композиты на основе полистирольной матрицы, армированной волокнами сахарного тростника, обработанными 6% NaOH, и получили максимальную прочность при изгибе 38,99 МПа и изгибный модуль упругости 4268 МПа.

**2.2. Долговечность.** Размеростабильность — основная характеристика КАНВ при длительном использовании. Если размеростабильность КАНВ хорошая, то композит считают долговечным [78, 171]. На долговечность КАНВ также влияет тип химической обработки волокон и материал матрицы. Поскольку микроорганизмы атакуют КАНВ в течение срока их эксплуатации, прочность и жесткость КАНВ может уменьшаться. Долговечность КАНВ выше, если их используют только в определенном диапазоне переменных окружающей среды [171].

**2.3. Прочность при межслойном сдвиге** — неотъемлемое свойство слоистого композита. Напряжение межслойного сдвига возникает между соседними слоями слоистого композита. Рекомендованы два метода испытаний — сдвиг короткой балки и сдвиг образца с двойным надрезом [172].

В [173] предложили использовать следующее уравнение для расчета прочности при межслойном сдвиге  $\sigma_{is}^u$  при испытании на трехточечный изгиб:

$$\sigma_{is}^u = \frac{3P}{4Bt},$$

где  $P$  — разрушающая нагрузка;  $B$  и  $t$  — ширина и толщина образца соответственно.

Прочность композитных материалов при межслойном сдвиге зависит от сцепления между соседними слоями и наличия между ними пустот или пузырьков воздуха.

В [174] экспериментально исследовали гибридный композит на основе эпоксидной матрицы, армированной банановыми и ананасовыми волокнами, с разной последовательностью укладки четырех слоев. Изготовили по четыре образца с каждой укладкой. Прочность  $\sigma_{is}^u$  композита с укладкой ананасовые—банановые—ананасовые—банановые волокна равна 21,095 МПа, а композита со слоями только из ананасовых волокон — наименьшая — 4,683 МПа. В [175] изготовили композиты из высокомолекулярного фенолформальдегида, армированного джутовыми и льняными волокнами. Экспериментально установили, что прочность  $\sigma_{is}^u$  композита из джутовых волокон имеет наименьшее значение — 1,4 МПа, а композита из льняных волокон — наибольшее — 4,4 МПа. В [176] экспериментально изучили прочность при межслойном сдвиге эпоксидных композитов с джутовыми волокнами и наполнителем из ценосфер. Установили, что джутовый композит с 5% по массе ценосфер достиг максимального значения  $\sigma_{is}^u = 27,5$  МПа. Дальнейшее увеличение концентрации наполнителя привело к резкому снижению величины  $\sigma_{is}^u$ .

**2.4. Усталостная прочность** — это предел прочности композитных материалов, подвергающихся циклическим нагрузкам. Некоторые исследования усталости провели при постоянной амплитуде напряжения при одноосном нагружении растяжение—растяжение с частотой 5 Гц с коэффициентом нагружения  $R = 0,1$  [177]. Механизм усталостного разрушения КАНВ обычно аналогичен таковому при квазистатическом нагружении, что очевидно из микрографических исследований КАНВ [178—180]. Частота нагружения также влияет на усталостную долговечность КАНВ в зависимости от ориентации волокон и материала матрицы. В [181] экспериментально провели испытания на усталость композитов на основе связующего из полиэфирной и эпоксидной смол, армированного сизалевыми волокнами, обработанными NaOH, при циклическом нагружении растяжение—растяжение с  $R = 0,1$  и при обратном нагружении с  $R = -1$ . Наблюдали повышенную усталостную долговечность композитов с волокнами, обработанными NaOH. С увеличением количества циклов при  $R = 0,1$  наблюдали петли гистерезиса с уменьшающейся площадью и обратный эффект при  $R = -1$ . В [179] изучали усталостное поведение эпоксидных композитов, армированных льняными волокнами, с укладкой  $[0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ ,

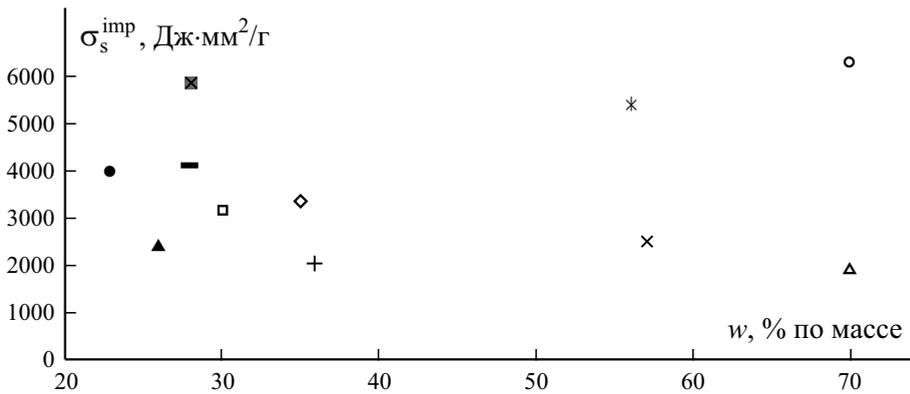


Рис. 18. Зависимость удельной прочности при ударе  $\sigma_s^{\text{imp}}$  от массового содержания волокон  $w$  и конфигурации композита: однонаправленные сизаль—ЭС ( $\Delta$ ) [187] и лен—ЭС ( $*$ ) [192], ортогонально армированные конопля—ЭС ( $-$ ) [188], лен—ЭС ( $\diamond$ ) [19], лен—винилэфир ( $\bullet$ ) [194], сизаль—ЭС ( $\circ$ ) [187], конопля—полимолочная кислота ( $\blacksquare$ ) [189], джут—полиэфир ( $+$ ) [195], лен—винилэфир ( $\times$ ) [193], на основе мата сизаль—полиэфир ( $\square$ ) [187] и конопля—полиэфир ( $\blacktriangle$ ) [190].

продемонстрировавшие хорошую усталостную прочность несостаренных композитов. В [182] для определения усталостной долговечности слоистого композитного материала при случайных вибрационных нагрузках разработали метод, основанный на эквивалентной спектроскопии.

**2.5. Низкоскоростной удар.** Повреждение, наносимое ударами движущегося объекта, называют скоростным ударом [183]. При этом удар, создаваемый объектом с малой скоростью (до 10 м/с), получил название низкоскоростного удара. Однако также имеют место высокоскоростные (от 0,05 до 1 км/с) и сверхскоростные (от 2 до 5 км/с) удары. Сопротивление скоростным ударам композитного материала, используемого в движущихся объектах (самолеты, автомобили и т. д.), — очень важная характеристика [184]. В [185] изготовили пять слоистых эпоксидных композитов, армированных льняными волокнами, и рассмотрели поглощенную энергию, максимальную силу и максимальное перемещение как параметры для понимания воздействия низкоскоростного удара. В эксперименте использовали груз массой 10,7 кг с полусферическим диаметром 20 мм, падающий с высоты 0,997 м, и установили, что композит из льняных волокон поглощает энергию 6,37 Дж, составляющую 41,17% от таковой 5-слойного эпоксидного углепластика с такой же геометрией. В [186] экспериментально изучили поведение при низкоскоростном ударе композита на основе эпоксидно-новолачной матрицы, армированной 28% по массе волокнами кубинской конопли, и получили максимальную ударную прочность 0,02 Дж/мм<sup>2</sup>. Исследования характеристик низкоскоростного удара КАНВ на основе разных волокон и матриц, разных укладок и при разном содержании волокон выполнили в [187—195] (рис. 18). Из данных

рисунка видно, что тип составляющих и укладка композита обуславливают разную прочность при низкоскоростном ударе. Оптимальное содержание волокон также обеспечивает большую ударную прочность композитов при низкоскоростном ударе. Прочность при низкоскоростном ударе является функцией удельной ударной вязкости [187].

**2.6. Баллистические свойства.** Свойство КАНВ выдерживать высокоэнергетические удары — это баллистическое свойство, которое можно использовать для изготовления защитного снаряжения войск и бронезилетов. Баллистические свойства КАНВ можно повысить, улучшив сцепление армирующих волокон с материалом матрицы за счет увеличения поперечных связей между ними, выполнив надлежащую химическую, плазменную или гамма-обработку [196]. В случае многослойной брони высокопрочный КАНВ может заменить средний слой брони в бронезилетах. В [197] разработали слоистый композит на основе полиэфирной смолы, армированной сизалевыми волокнами, используемый в качестве второго слоя в многослойном бронезилете вместо слоистого органо-пластика. Установили, что полиэфирный композит с 30% сизалевых волокон обладал баллистическими свойствами, сравнимыми с таковыми слоистого органо-пластика. В [198] изготовили эпоксидный композит, армированный 30% ананасовых волокон, который можно использовать в качестве дополнительного слоя в баллистической броне, выдерживающей удар винтовочных боеприпасов калибром 7,62 мм.

**2.7. Вибрационные свойства** — это демпфирующая характеристика композитного материала, иллюстрирующая его способность поглощать энергию колебаний. Для поглощения нежелательных вибраций необходим высокий коэффициент демпфирования. В [199] экспериментально и численно исследовали вибрационные характеристики композитов на биоэпоксидной матрице, армированной льняными волокнами, с внедренным натуральным вязкоупругим слоем и установили хорошее согласование между конечно-элементными и экспериментальными результатами. В [200] провели экспериментальное исследование вибрационных свойств композита с полиэфирной матрицей, тканой оболочкой кокосового ореха и короткими банановыми волокнами, изменяя многослойную структуру композита, и установили, что схема укладки композита кокос—банан—кокос поглощает максимальную энергию колебаний, указывая на ее высокую демпфирующую способность. В [201] экспериментально изучили колебательные характеристики эпоксидных композитов, армированных джутом, линином и диоксидом кремния, и установили, что добавление до 2% по массе диоксида кремния увеличивает собственную частоту композита. Введение большего количества диоксида кремния ее уменьшает. В [202] методом импульсного возбуждения экспериментально изучали демпфирующие и вибрационные свойства композитов на основе волокнисто-армированного полипропилена и наблюдали, что композит с 30% по массе армирующих волокон имеет наибольшую собственную частоту

в силу высокой жесткости композита, а коэффициент демпфирования уменьшается по мере увеличения содержания волокон.

**2.8. Динамические механические свойства** (модуль накопления, модуль потерь и коэффициент демпфирования материала) зависят от времени и температуры [203]. Модуль накопления обычно связан с модулем Юнга композита, характеризующим его жесткость, а модуль потерь — мерой энергии, которую он может рассеять при воздействии внешней нагрузки. Коэффициент демпфирования  $\text{tg}\delta$  очень чувствителен к температуре. На динамические свойства композита влияют длина, ориентация и процентное содержание волокон. Температура стеклования — температура, при которой термореактивный полимер становится мягким и вязким, как резина. При этой температуре модуль потерь максимален. В [204] экспериментально исследовали динамические механические свойства тканого гибридного композита на основе волокон конопли и полиэтилен-полиэтилентерефталата и определили его температуру стеклования, равную 69 °С. В [205] экспериментально исследовали динамические механические свойства композита с эпоксидной матрицей, армированной волокнами ананаса и кокоса, и установили, что его коэффициент демпфирования уменьшается с увеличением объемного содержания волокон. При введении в эпоксидную матрицу ананасовых и кокосовых волокон наблюдали повышенные значения модуля потерь, модуля накопления и температуры стеклования. В [206] экспериментально оценили динамические механические свойства эпоксидного композита с сизалевыми волокнами, обработанными бикарбонатом натрия, и установили, что диаграмма Коула—Коула композита имеет вид несовершенного полукруга, что указывает на неоднородность распределения составляющих композита. Композит с обработанными сизалевыми волокнами обладал лучшей однородностью и продемонстрировал большую термостабильность и несущую способность при увеличении частоты.

**2.9. Термомеханические свойства** композитных материалов определяют методом термомеханического анализа (ТМА). Эти свойства зависят от коэффициента термического расширения, температуры стеклования, размягчения композита, термостойкости и воздействия окружающей среды [207]. В [208] посредством ТМА оценили термомеханические свойства композита с полипропиленовой матрицей, армированной переработанной целлюлозой, и наблюдали повышенную термическую и термоокислительную стабильность композита. В [209] экспериментально исследовали термомеханические свойства эпоксидного композита меламин—мочевина—формальдегид, армированного длинными и короткими кокосовыми волокнами, и получили максимальную теплопроводность  $0,1078 \pm 0,0072$  Вт/(м·К). На первом этапе деградации термогравиметрические кривые свидетельствовали о меньшей потере массы кокосовых волокон. В [210] экспериментально определили термомеханические свойства композита на основе полимолочной кислоты, армированной короткими льняными волокнами, и определили для большинства образцов темпера-

туру стеклования  $\approx 60$  °С, тогда как для композита с 20% по массе волокон наблюдали ее увеличение на 0,8 °С.

### 3. Свойства, зависящие от времени

**3.1. Ползучесть.** Длительное использование КАНВ при постоянной температуре приводит к ползучести, а его общая прочность при растяжении и сжатии снижается [21]. Условия окружающей среды также влияют на характер и интенсивность ползучести. В силу ползучести может произойти нарушение сцепления на поверхности раздела, деформация матрицы, вытягивание и разрыв волокон, распространение трещин. В [211] изучили поведение ползучести композитов из смеси целлюлозы и крахмала, армированной сизалевыми волокнами, экспериментально и с применением четырехпараметрической модели и установили, что сизалевые волокна повышают сопротивление ползучести по мере увеличения их содержания.

Ползучесть — зависящее от времени свойство материала, характеризующее его устойчивость к нагрузкам в течение определенного периода времени при определенной температуре и давлении. Существует два метода определения ползучести материала — традиционный и ускоренный. Первый основан на зависимости от нагрузки и времени, а второй — от температуры (рис. 19) [212]. Ползучесть сопровождается деформациями, когда в течение длительного периода нагрузку прикладывают при постоянной или изменяющейся температуре. Накопленная деформация ползучести представляет собой комбинацию остаточной и обратимой деформаций. Когда накопленная деформация достигает определенного предельного значения, начинается разрушение материала при ползучести [213].

Большинство исследований ползучести КАНВ показывает, что сопротивление ползучести возрастает с увеличением содержания волокон до определенного предела, а затем уменьшается [214—217].

В [218] провели экспериментальное исследование характеристик ползучести композита на основе полимолочной матрицы, армированной бамбуковыми волокнами, путем краткосрочных испытаний на ускоренную ползучесть в диапазоне температур от 25 до 120 °С, используя принцип температурно-временной аналогии. Сопротивление ползучести композитов



Рис. 19. Методы определения поведения ползучести.

с 60% содержанием волокон было наибольшим, а затем уменьшалось при увеличении содержания до 70%.

В [219] разработали многооперационный стенд для испытания на ползучесть при изгибе на открытом воздухе. В [220] экспериментально определили параметры ползучести композитов из полипропилена и волокон кенафа с привитым крахмалом. Использовали композиты с короткими и длинными волокнами. Результаты показали, что волокна обоих типов уменьшили скорость деформирования, но увеличили прочность. В [221] экспериментально проанализировали поведение ползучести полилактидных композитов с матом из льняных волокон, для получения обобщенной кривой модуля накопления использовали принцип температурно-временной аналогии и сообщили об их повышенной устойчивости к ползучести при нагружении с низкими частотами.

На рис. 20 приведена микрофотография разрушения при ползучести композита на основе полимолочной кислоты, армированной тканью из конопляных волокон. Видны трещины в волокнах. При длительной ползучести имели место большие деформации [222].

**3.2. Усадка.** По прошествии значительного времени в натуральных волокнах происходит усадка в силу увеличения их гидрофобности [4]. При удалении влаги с повышением температуры происходит усадка КАНВ, обуславливающая нестабильность размеров и хрупкость, и тогда КАНВ можно легко сломать, приложив некоторое давление [223]. Усадка может происходить в силу миграции, перегруппировки и переориентации молекул композитного материала, создающих внутренние напряжения между волокнами и матрицей и уменьшающих прочность при растяжении и сжатии.

**3.3. Термические свойства** КАНВ зависят от теплопроводности материалов натуральных волокон и матрицы, теплового сопротивления между границами раздела волокна и матрицы [100, 224]. Теплопроводность КАНВ

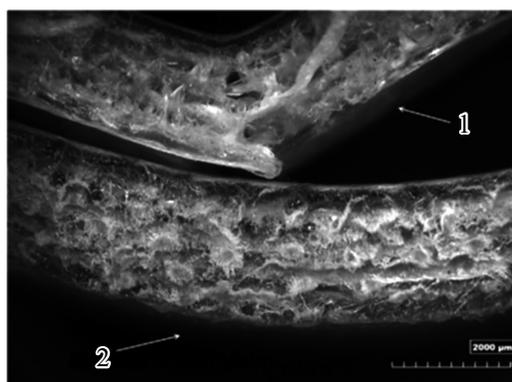


Рис. 20. Полученное с помощью датчика с зарядовой связью цифровое изображение высокого разрешения композита на основе полимолочной кислоты и ткани из волокон конопли (30% по массе), подверженного длительному (1) и кратковременному (2) испытанию на ползучесть при нагрузке 54,34 МПа и температуре 40 °С [222].

Табл. 5

Обобщенный результат исследований механических свойств в КАНВ

Источник	Волокно	Матрица	Метод изготовления	Ориентация волокон	Содержание, % по массе	Ключевое наблюдение
[230]	Лен, хлопок и конопля	Полипропилен/ натуральный каучук	Формование под давлением	Случайная	10, 20, 30, 40	При 30% по массе волокон длиной 1 мм наибольшая прочность при растяжении 32,8 и 34,5 МПа получена при использовании конопля и льна соответственно
[231]	Джут и куриное перо	Эпоксидная	Ручная выкладка	Случайная	0-30 (джут) 30-0 (куриное перо)	Массовое содержание 10% джута и 20% куриного пера обеспечило наибольшую прочность при растяжении и изгибе
[232]	Сизаль и конопля	Термопластичный крахмал/ латекс	Формование под давлением и термомпрессование	Случайная	0-20 (без латекса), 0-20 (с латексом)	Прочность при растяжении и изгибе возрастала по мере увеличения содержания волокон
[233]	Лен	Полипропилен	Экструзия	0	20, 30, 40	Увеличение объемного содержания льняных волокон снижало прочность композита при межповерхностном сдвиге
[234]	Койр	Натуральный каучук, полипропилен	Двухвалковое вальцевание	Продольная	До 30	Наибольшая прочность при растяжении и модуль упругости достигнуты при 25% по массе волокон
[235]	Конопля	Полимолочная	Формование под давлением	Однонаправленная	30	Композит с сатиновым переплетением волокон обладал наибольшей прочностью, жесткостью и вязкостью разрушения
[56]	Аренга перистая/ тростник	Полимолочная	Формование под давлением	0	0, 10, 20, 30	Наибольшую прочность при растяжении 29,74 МПа продемонстрировал композит с 10% по массе волокон.
[236]	Джут	Полиэфирная	Ручная выкладка	Тканый мат	25	Изучено многоосное нагружение. Предел усталостной выносливости композита составил 65% от прочности композита при растяжении
[237]	Джут, пальма, пустье фруктовые гроздь (ПФГ)	Эпоксидная	Ручная выкладка	Ткань	0	Гибридная комбинация ПФГ и джутовых волокон обеспечила большую прочность при растяжении и изгибе, чем однокомпонентный композит с двумя поверхностными слоями
[131]	Ковыль	Полиэфирная	Формование вакуумной инфузией	Поперечная и продольная	38	Определена поперечная прочность 30 МПа, продольная прочность 144 МПа и модуль упругости при растяжении 8,8 ГПа
[44]	Сизаль	Натуральный каучук	Двухвалковое вальцевание	Поперечная и продольная	30	Коэффициент релаксации волокистого продольно ориентированного композита оказался больше, чем поперечно ориентированного

[48]	Кенаф, багасса	Полипропилен	Литьевое формование	Случайная	10, 20, 30	Давление сжатия при литьевом формовании до определенного предела напрямую влияет на модуль Юнга изготовляемого композита
[238]	Сизаль	Полиуретан, фенольная смола	Формование под давлением	Ткань, плотное переплетение	33-44	Слоистый композит на основе фенольной смолы и сизалевых волокон продемонстрировал прочность при растяжении 25 МПа, большую, чем композит из полиуретана с сизалевыми волокнами (17 МПа)
[66]	Сизаль, пальма	Натуральный каучук	Двухвалковое вальцевание	Продольная, поперечная и наклонная	30, 50, 70	Композиты с продольной ориентацией волокон имели большие значения механических характеристик, чем с поперечной
[239]	Сизаль	Винилфенольная и эпоксидная, полимер	Формование с переносом смолы	Продольная, ткань	32	Обработка поверхности волокон обеспечила большую прочность композитов при растяжении. Наибольшую прочность наблюдали при влажности 30%
[240]	Асаи	Натуральный каучук	Двухвалковое вальцевание	Случайная	5, 10	Степень сорбции воды возросла по мере увеличения содержания волокон. Установлено, что механические свойства композита сопоставимы с используемыми в промышленности "зелеными" композитами
[83]	Генекен	Полиэтилен высокой плотности	Формование с переносом смолы	Продольная Случайная	20	Композиты с продольной ориентацией волокон продемонстрировали увеличение прочности при растяжении и изгибе на 3 и 30% соответственно
[121]	Джут	Натуральный каучук	Двухвалковое вальцевание	Случайная	0	Алкилирование силианом комбинарованного композита с джутовыми волокнами продемонстрировало наибольшие механические характеристики по сравнению с другими исследованными композитами
[87]	Курауа (ананас эректифолиус)	Полиэтилен	Экструзия	Случайная	2, 5, 10	При использовании волокон, обработанных силианом, получена кристалличность 40%. Волокна не влияют на температуру термодеструкции матрицы
[37]	Лен	Эпоксидная	Формование с переносом смолы	Однонаправленная, два разных саржевых переплетения	40	Композит из льняных волокон показал большую горючесть и большие деформации, чем композит из етекловолокон
[39]	Джут	Поли (3-гидроксипропан-2-ил-бутират-со-3-гидроксипропан-1-ил-этан-1-ил) — гранулы	Формование под давлением	Случайная	27	Введение в композит 4% наноглины улучшило его механические свойства
[241]	Бамбук	Эпоксидная, поливинилэфирная	Ручная выкладка	Осевая	0, 10, 20, 30, 40	Эпоксидный композит, армированный 40% бамбуковых волокон, имел наибольшие значения прочности при растяжении (119,39 МПа) и изгибе (161,58 МПа), чем другие исследованные композиты

с низким содержанием натуральных волокон близка к теплопроводности материала матрицы [225, 226]. Химическая обработка композита, тип волокна и матрицы также влияют на теплопроводность КАНВ [227]. Для определения термостабильности КАНВ обычно используют термогравиметрический анализ (ТГА) [228]. В [229] экспериментально, используя тесты ТГА, изучали композит на основе полипропиленовой матрицы, армированной 25% по массе волокон марокканской конопли, и выяснили, что его термическая деградация на 8% больше, чем чистого полипропилена.

В табл. 5 обобщены результаты предыдущих исследований свойств разных КАНВ.

**3.4. Влияние влаги.** В силу капиллярности КАНВ поглощают влагу из окружающей среды [79]. Гидрофильность натуральных волокон можно уменьшить с помощью разных методов химической обработки волокон: ацетилирования, пероксидирования и алкилирования [242]. Влага может быть опасной, когда она присутствует в КАНВ в большом количестве, но может быть полезной для сохранения размеростабильности и прочности КАНВ при приемлемом уровне.

Табл. 6

## Применение КАНВ

Ссылка	Свойства	Матрица	Применение
[244, 245]	Устойчивость к химическим веществам	Полипропилен	Лабораторное оборудование, строительство, автомобилестроение, транспорт, упаковка
[246]	Высокая прочность при растяжении и малая масса	Натуральный каучук, эпоксидная смола	Автомобильная промышленность, чехлы для мобильных телефонов, транспорт, электронное оборудование
[247]	Высокая теплопроводность, низкая электропроводность	Полифениленсульфид	Печатные платы в электронике, телефонах, телекоммуникационном оборудовании, бытовой электронике.
[248]	Коррозионная стойкость	Полиэтилен	Упаковка, автомобилестроение, транспорт, обработка химикатов, трубопроводы
[249]	Нетоксичность, биоразлагаемость	Полимолочная кислота	Бытовая электроника, потребительские товары, упаковка для пищевых продуктов, игрушки, корпуса для ручек, биомедицинские приложения
[250]	Износоустойчивость, дешевизна, акустическая и водонепроницаемость	Полиуретан	Железные дороги, трубопроводы, акустика
[251]	Гидрофобность, низкая ползучесть, высокая прочность	Полисульфон	Водные приложения, корабли, пищевая упаковка, водопровод

#### 4. Применения

КАНВ находят широкое применение в автомобильной промышленности, бытовой электронике, авиастроении и домашнем хозяйстве [243]. Внутренние части автомобилей могут быть изготовлены из долговечных натуральных волокон [101]. Бытовая электроника, состоящая из полимерных компонентов, особенно ее корпуса, не поддается биоразложению, но ее компоненты можно заменить на изготовленные из недорогих и высокопрочных КАНВ, уменьшив вредное воздействие на окружающую среду. КАНВ пригодны в качестве электроизоляционных материалов, поскольку обладают низкой электро- и теплопроводностью. В табл. 6 указаны возможные области применения биокомпозитов. Однако натуральные волокна должны быть совместимы с материалом матрицы.

Использование КАНВ в сложных системах в космической, ракетной и авиационной промышленности стимулирует более подробные исследования их свойств.

#### 5. Перспективы

КАНВ при правильном производстве являются высокопрочными материалами, сравнимыми с композитами из синтетических волокон, и могут использоваться в разных областях. Согласно текущему развитию исследований эффективность КАНВ возрастает день ото дня. В ближайшие годы рыночная стоимость КАНВ станет выше, поскольку они становятся все более популярными. Количество исследований в области КАНВ постепенно увеличивается. Разрабатываются разные методы снижения стоимости изготовления КАНВ и повышения их долговечности и прочности за счет использования разных видов и методов химической обработки. Люди и правительства начинают осознавать, что КАНВ являются биоразлагаемыми материалами, способными защитить разрушающийся озоновый слой и предотвратить глобальное потепление и катастрофы. Рыночная стоимость этих материалов возрастает, что побуждает фермеров выращивать и извлекать больше натуральных волокон и продавать их производителям.

#### Заключение

Обилие натуральных волокон на Земле делает их наиболее экономичным решением для замены невозобновляемых ресурсов на основе нефти в армированных композитных материалах. Подробный обзор, представленный в настоящей работе, поможет инженерному сообществу лучше понять разные свойства КАНВ и разработать новые экологически чистые материалы с улучшенными характеристиками. В настоящем обзоре также рассмотрены механические свойства и их влияние на срок эксплуатации

КАНВ. Выбор натуральных волокон для КАНВ в первую очередь зависит от желаемых свойств композитов. Представленный обзор позволяет сделать следующие выводы.

- Натуральные волокна можно извлечь из таких природных источников, как растения и животные. Они доступны на Земле в изобилии и поэтому имеют большой потенциал в качестве армирующего материала для производства композитных материалов. Растительные волокна обладают высокой прочностью при растяжении и долговечностью.

- Основное преимущество применения КАНВ — их экологичность. Процесс производства таких композитов не опасен для окружающей среды и может значительно снизить выбросы парниковых газов.

- Растительные волокна склонны к влагопоглощению и теряют свою прочность без надлежащей обработки. Существуют разные виды химической обработки, способные повысить их прочность и долговечность. Результаты предыдущих исследований показали, что композиты с необработанными натуральными волокнами имеют более низкие механические характеристики, чем с обработанными.

- Существует несколько видов химической обработки натуральных волокон. Щелочная обработка — экономичный метод защиты композитных материалов и придания им прочности.

- Существуют разные технологические методы для производства КАНВ. Наиболее распространен метод ручной выкладки.

- Свойства КАНВ зависят от характеристик используемых волокон и материалов матрицы, сцепления между ними и вида химической обработки. Температура и давление — физические переменные, самым непосредственным образом влияющие на свойства КАНВ.

- Прочность КАНВ зависит от межповерхностного сцепления волокон с матрицей; предыдущие исследования показали, что шивка значительно увеличивает их прочность при растяжении и изгибе.

- Определенное количество влаги в волокнах необходимо для сохранения их прочности при растяжении. Избыточное содержание влаги ухудшает прочность сцепления волокон с матрицей и снижает общую прочность композитов при растяжении и изгибе. Слишком низкое содержание влаги может обусловить усадку композита и плохую размеростабильность. Термостабильность — важный параметр, который необходимо учитывать при выборе КАНВ для применений в жарких условиях и при длительном использовании.

- Разные комбинации волокон и матриц подходят для разных применений КАНВ. В ходе дальнейших исследований статико-механические и зависящие от времени свойства КАНВ могут быть улучшены. Огнеупорность также является важной характеристикой КАНВ, которую можно использовать для снижения их стоимости и повышения технологичности.

- КАНВ становятся популярными материалами для изготовления разных промышленных и бытовых товаров. Основная причина исполь-

зования КАНВ — технологичность, высокая прочность, улучшенная размеростабильность и повышенная прочность при изгибе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Al-Oqla F. M. and Salit M. S.* Materials Selection for Natural-Fiber Composites. — Cambridge: Woodhead Publ., 2017.
2. *Sameni J. K., Ahmad S. H., and Zakaria S.* Effect of MAPE on the mechanical properties of rubber wood fiber/thermoplastic natural rubber composites // *Adv. Polym. Techn.* — 2004. — Vol. 23, No. 1. — P. 18—23.
3. *Stokke D. D., Wu Q., and Han G.* Wood and Natural-Fiber Composites. — John Wiley & Sons, 2013.
4. *Murty V. M. and De S. K.* Effect of particulate fillers on short jute fiber-reinforced natural rubber composites // *J. Appl. Polym. Sci.* — 1982. — Vol. 27, No. 12. — P. 4611—4622.
5. *Lau K. T., Cheung K. H. Y., and Hui D.* Natural-fiber composites // *Composites: Part B.* — 2009. — Vol. 40, No. 7. — P. 591—593.
6. *Yu H. N., Kim S. S., Hwang I. U., and Lee D. G.* Application of natural-fiber-reinforced composites to trenchless rehabilitation of underground pipes // *Compos. Struct.* — 2008. — Vol. 86, Nos. 1—3. — P. 285—290.
7. *Gutiérrez-Acosta O. B., Arriaga S., Escobar-Barrios V. A., Casas-Flores S., and Almendarez-Camarillo A.* Performance of innovative PU-foam and natural fiber-based composites for the biofiltration of a mixture of volatile organic compounds by a fungal biofilm // *J. Hazard. Mater.* — 2012. — Nos. 201—202. — P. 202—208.
8. *Pervaiz M. and Sain M. M.* Carbon storage potential in natural-fiber composites // *Resour. Conserv. Recycl.* — 2003. — Vol. 39, No. 4. — P. 325—340.
9. *Pandey J. K., Ahn S. H., Lee C. S., Mohanty A. K., and Misra M.* Recent advances in the application of natural fiber based composites // *Macromol. Mater. Eng.* — 2010. — Vol. 295, No. 11. — P. 975—989.
10. *Gholampour A. and Ozbakkaloglu T.* A review of natural-fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications // *J. Mater. Sci.* — 2020. — Vol. 55, No. 3. P. — 829—892.
11. *Shanks R. A., Hodzic A., and Wong S.* Thermoplastic biopolyester natural-fiber composites // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2004. — Vol. 91, No. 4. — P. 2114—2121.
12. *Ku H., Wang H., Pattarachaiyakoop N., and Trada M.* A review on the tensile properties of natural-fiber-reinforced polymer composites // *Composites: Part B.* — 2011. — Vol. 42, No. 4. — P. 856—873.
13. *Coats E. R., Loge F. J., Wolcott M. P., Englund K., and McDonald A. G.* Production of natural-fiber-reinforced thermoplastic composites through the use of polyhydroxybutyrate-rich biomass // *Bioresour. Technol.* — 2008. — Vol. 99, No. 7. — P. 2680—2686.
14. *García M., Garmendia I., and García J.* Influence of natural fiber type in eco-composites // *J. Appl. Polymer Sci.* — 2008. — Vol. 107, No. 5. — P. 2994—3004.
15. *O'Donnell A., Dweib M. A., and Wool R. P.* Natural-fiber composites with plant oil-based resin // *Compos. Sci. Technol.* — 2004. — Vol. 64, No. 9. — P. 1135—1145.
16. *Ray D.* State-of-the-art applications of natural-fiber composites in the industry // *Natural Fiber Composites.* — Press-Taylor&Francis Group, 2015.
17. *Pervaiz M. and Sain M. M.* Sheet-molded polyolefin natural-fiber composites for automotive applications // *Macromol. Mater. Eng.* — 2003. — Vol. 288, No. 7. — P. 553—557.

18. *Mansor M. R. and Sapuan S. M.* Concurrent Conceptual Design and Materials Selection of Natural-fiber composite Products. — Springer, 2018.

19. *Tan T., Santos S. F., Savastano H., and Soboyejo W. O.* Fracture and resistance-curve behavior in hybrid natural fiber and polypropylene fiber reinforced composites // *J. Mater. Sci.* — 2012. — Vol. 47, No. 6. — P. 2864—2874.

20. *Adekunle K., Cho S., Ketzscher R., and Skrifvars M.* Mechanical properties of natural fiber hybrid composites based on renewable thermoset resins derived from soybean oil, for use in technical applications // *Appl. Polym. Sci.* — 2011. — Vol. 124, No. 6. — P. 4530—4541.

21. *Caulfield D. F., Feng D., Prabawa S., Young R. A., and Sanadi A. R.* Interphase effects on the mechanical and physical aspects of natural-fiber composites // *Angew. Makromol. Chem.* — 1999. — Vol. 272, No. 4757. — P. 57—64.

22. *Alves C. et al.* Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites // *J. Clean. Prod.* — 2010. — Vol. 18, No. 4. — P. 313—327.

23. *Rong M. Z., Zhang M. Q., Liu Y., Yang G. C., and Zeng H. M.* The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2001. — Vol. 61, No. 10. — P. 1437—1447.

24. *Martone P. T. et al.* Discovery of lignin in seaweed reveals convergent evolution of cell-wall architecture // *Curr. Biol.* — 2009. — Vol. 19, No. 2. — P. 169—175.

25. *Brunner G.* Processing of biomass with hydrothermal and supercritical water. Ch. 8 // *Hydrothermal and Supercritical Water Processes*. Vol. 5. — Elsevier, 2014. — P. 395—509.

26. *Baley C., Le Duigou A., Bourmaud A., and Davies P.* Influence of drying on the mechanical behavior of flax fibres and their unidirectional composites // *Composites: Part A*. — 2012. — Vol. 43, No. 8. — P. 1226—1233.

27. *Charlet K., Baley C., Morvan C., Jernot J. P., Gomina M., and Bréard J.* Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites // *Composites: Part A*. — 2007. — Vol. 38, No. 8. — P. 1912—1921.

28. *Charlet K., Eve S., Jernot J. P., Gomina M., and Breard J.* Tensile deformation of a flax fiber // *Procedia Eng.* — 2009. — No. 1. — P. 233—236.

29. *Bos H. L. and Donald A. M.* In situ ESEM study of the deformation of elementary flax fibres // *J. Mater. Sci.* — 1999. — Vol. 34, No. 13. — P. 3029—3034.

30. *Madsen B. and Gamstedt E. K.* Wood versus plant fibers: similarities and differences in composite applications // *Adv. Mater. Sci. Eng.* — 2013. — Article ID 564346.

31. *Gassan J., Chate A., and Bledzki A. K.* Calculation of elastic properties of natural fibers // *J. Mater. Sci.* — 2001. — Vol. 36, No. 15. — P. 3715—3720.

32. *Campilho R. D. S. G.* Natural-Fiber Composites. — CRC Press, 2015.

33. *Drzal L. T.* Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites. — CRC Press, 2005.

34. *Kabir M. M., Wang H., Lau K. T., and Cardona F.* Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview // *Composites: Part B*. — 2012. — Vol. 43, No. 7. — P. 2883—2892.

35. *Venkateshwaran N. and Elayaperumal A.* Banana fiber reinforced polymer composites — A review // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2010. — Vol. 29, No. 15. — P. 2387—2396.

36. *Cristaldi G., Latteri A., Recca G., and Cicala G.* Composites based on natural fibre fabrics // *Woven Fabr. Eng.* — 2010. — Vol. 17. — P. 317—342.

37. *Chai M. W., Bickerton S., Bhattacharyya D., and Das R.* Influence of natural fibre reinforcements on the flammability of bio-derived composite materials // *Composites: Part B*. — 2012. — Vol. 43, No. 7. — P. 2867—2874.

38. *Li X., Tabil L. G., and Panigrahi S.* Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review // *J. Polym. Environ.* — 2007. — Vol. 15, No. 1. — P. 25—33.
39. *Hossain M. K., Dewan M. W., Hosur M., and Jeelani S.* Mechanical performances of surface modified jute fiber reinforced biopol nanophased green composites // *Composites: Part B.* — 2011. — Vol. 42, No. 6. — P. 1701—1707.
40. *Rouison D., Sain M., and Couturier M.* Resin transfer molding of natural-fiber-reinforced composites: Cure simulation // *Compos. Sci. Technol.* — 2004. — Vol. 64, No. 5. — P. 629—644.
41. *Jawaid M., Abdul Khalil H. P. S., Hassan A., Dungani R., and Hadiyane A.* Effect of jute fibre loading on tensile and dynamic mechanical properties of oil palm epoxy composites // *Composites: Part B.* — 2013. — Vol. 45, No. 1. — P. 619—624.
42. *Thielemans W. and Wool R. P.* Kraft lignin as fiber treatment for natural fiber-reinforced composites // *Polym. Compos.* — 2005. — Vol. 26, No. 5. — P. 695—705.
43. *Kim S. J., Moon J. B., Kim G. H., and Ha C. S.* Mechanical properties of polypropylene/natural-fiber composites: Comparison of wood fiber and cotton fiber // *Polym. Test.* — 2008. — Vol. 27, No. 7. — P. 801—806.
44. *Varghese S., Kuriakose B., and Thomas S.* Stress relaxation in short sisal-fiber-reinforced natural rubber composites // *J. Appl. Polym. Sci.* — 1994. — Vol. 53, No. 8. — P. 1051—1060.
45. *Lopattananon N., Panawarangkul K., Sahakaro K., and Ellis B.* Performance of pineapple leaf fiber-natural rubber composites: The effect of fiber surface treatments // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2006. — Vol. 102, No. 2. — P. 1974—1984.
46. *Barkoula N. M., Alcock B., Cabrera N. O., and Peijs T.* Flame-retardancy properties of intumescent ammonium poly(phosphate) and mineral filler magnesium hydroxide in combination with graphene // *Polym. Polym. Compos.* — 2008. — Vol. 16, No. 2. — P. 101—113.
47. *Dixit A., Mali H. S., and Misra R. K.* Investigation of the thermomechanical behavior of a  $2 \times 2$  twill weave fabric advanced textile composite // *Mech. Compos. Mater.* — 2015. — Vol. 51, No. 2. — P. 253—264.
48. *Shibata S., Cao Y., and Fukumoto I.* Study of the flexural modulus of natural fiber/polypropylene composites by injection molding // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2006. — Vol. 100, No. 2. — P. 911—917.
49. *Dixit A. and Mali H. S.* Modeling techniques for predicting the mechanical properties of woven-fabric textile composites: a review // *Mech. Compos. Mater.* — 2013. — Vol. 49, No. 1. — P. 1—20.
50. *Baghaei B., Skrifvars M., and Berglin L.* Manufacture and characterisation of thermoplastic composites made from PLA/hemp co-wrapped hybrid yarn prepregs // *Composites: Part A.* — 2013. — Vol. 50. — P. 93—101.
51. *Savastano H., Santos S. F., Radonjic M., and Soboyejo W. O.* Fracture and fatigue of natural fiber-reinforced cementitious composites // *Cem. Concr. Compos.* — 2009. — Vol. 31, No. 4. — P. 232—243.
52. *Tripathi P., Gupta V. K., Dixit A., Mishra R. K., and Sharma S.* Development and characterization of low cost jute, bagasse and glass fiber reinforced advanced hybrid epoxy composites // *AIMS Mater. Sci.* — 2018. — Vol. 5, No. 2. — P. 320—337.
53. *Schirp A., Loge F., Aust S., Swaner P., Turner G., and Wolcott M.* Production and characterization of natural fiber-reinforced thermoplastic composites using wheat straw modified with the fungus *Pleurotus ostreatus* // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2006. — Vol. 102, No. 6. — P. 5191—5201.

54. *Geethamma V. G., Pothen L. A., Rhao B., Neelakantan N. R., and Thomas S.* Tensile stress relaxation of short-coir-fiber-reinforced natural rubber composites // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2004. — Vol. 94, No. 1. — P. 96—104.

55. *Valadez-Gonzalez A., Cervantes-Uc J. M., Olayo R., and Herrera-Franco P. J.* Effect of fiber surface treatment on the fiber-matrix bond strength of natural-fiber-reinforced composites // *Composites: Part B.* — 1999. — Vol. 30, No. 3. — P. 309—320.

56. *Chalid M., Rahman A., Ferdian R., Nofrijon, and Priyono B.* On the tensile properties of polylactide (pla)/arenga pinnata ijuk fibre composite // *Macromol. Symp.* — 2015. — Vol. 353, No. 1. — P. 108—114.

57. *Du Y., Wu T., Yan N., Kortschot M. T., and Farnood R.* Pulp fiber-reinforced thermoset polymer composites: Effects of the pulp fibers and polymer // *Composites: Part B.* — 2013. — Vol. 48. — P. 10—17.

58. *Sgriccia N. and Hawley M. C.* Thermal, morphological, and electrical characterization of microwave processed natural-fiber composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2007. — Vol. 67, No. 9. — P. 1986—1991.

59. *Mohanty A. K., Misra M., and Drzal L. T.* Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: an overview // *Compos. Interfaces.* — 2001. — Vol. 8, No. 5. — P. 313—343.

60. *Asim M., Jawaid M., Abdan K., and Ishak M. R.* Effect of alkali and silane treatments on mechanical and fibre-matrix bond strength of kenaf and pineapple leaf fibres // *J. Bionic Eng.* — 2016. — Vol. 3, No. 3. — P. 426—435.

61. *Nam T. H., Ogiwara S., Tung N. H., and Kobayashi S.* Effect of alkali treatment on interfacial and mechanical properties of coir fiber reinforced poly (butylene succinate) biodegradable composites // *Composites: Part B.* — 2011. — Vol. 42, No. 6. — P. 1648—1656.

62. *De D., De D., and Adhikari B.* Curing characteristics and mechanical properties of alkali-treated grass-fiber-filled natural rubber composites and effects of bonding agent // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2006. — Vol. 101, No. 5. — P. 3151—3160.

63. *Jana S. C. and Prieto A.* On the development of natural-fiber composites of high-temperature thermoplastic polymers // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2002. — Vol. 86, No. 9. — P. 2159—2167.

64. *Geethamma V. G., Joseph R., and Thomas S.* Short coir fiber-reinforced natural rubber composites: Effects of fiber length, orientation, and alkali treatment // *J. Appl. Polym. Sci.* — 1995. — Vol. 55, No. 4. — P. 583—594.

65. *Mathew L. and Joseph R.* Mechanical properties of short-isora-fiber-reinforced natural rubber composites: Effects of fiber length, orientation, and loading; alkali treatment; and bonding agent // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2007. — Vol. 103, No. 3. — P. 1640—1650.

66. *Jacob M., Thomas S., and Varughese K. T.* Mechanical properties of sisal/oil palm hybrid fiber reinforced natural rubber composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2004. — Vol. 64, Nos. 7—8. — P. 955—965.

67. *Jacob M., Francis B., Thomas S., and Varughese K. T.* Dynamical mechanical analysis of sisal/oil palm hybrid fiber-reinforced natural rubber composites // *Polym. Compos.* — 2006. — Vol. 27, No. 6. — P. 671—680.

68. *Boopathi L., Sampath P. S., and Mysamy K.* Investigation of physical, chemical and mechanical properties of raw and alkali treated Borassus fruit fiber // *Composites: Part B.* — 2012. — Vol. 43, No. 8. — P. 3044—3052.

69. *Srisuwan S., Prasoetsopha N., Suppakarn N., and Chumsamrong P.* The effects of alkalinized and silanized woven sisal fibers on mechanical properties of natural rubber modified epoxy resin // *Energy Procedia.* — 2014. — Vol. 56. — P. 19—25.

70. Guzmán R. E., Gómez S., Amelines O., and Aparicio G. M. Superficial modification by alkalization of cellulose fibres obtained from Figue leaf // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. — 2018. — Vol. 437, No. 1. — P. 0—12.
71. Juárez C., Durán A., Valdez P., and Fajardo G. Performance of “Agave lecheguilla” natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions // Build. Environment. — 2007. — Vol. 42, No. 3. — P. 1151—1157.
72. Sobczak L., Brüggemann O., and Putz R. F. Polyolefin composites with natural fibers and wood-modification of the fiber/filler-matrix interaction // J. Appl. Polym. Sci. — 2013. — Vol. 127, No. 1. — P. 1—17.
73. Rowell R. M. Acetylation of natural fibers to improve performance // Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. — 2004. — Vol. 418, No. 1. — P. 153—164.
74. Rowell R. M., Tillman A.-M., and Simonson R. A simplified procedure for the acetylation of hardwood and softwood flaxes for flakeboard production // J. Wood Chem. Technol. — 1986. — Vol. 6, No. 3. — P. 427—448.
75. Fitch-Vargas P. R. et al. Mechanical, physical and microstructural properties of acetylated starch-based biocomposites reinforced with acetylated sugarcane fiber // Carbohydr. Polym. — 2019. — Vol. 219. — P. 378—386.
76. Souza Da Rosa T., Trianoski R., Michaud F., Belloncle C., and Iwakiri S. Efficiency of different acetylation methods applied to cellulose fibers waste from pulp and paper mill sludge // J. Nat. Fibers. — 2020. — Vol. 17, March. — P. 1—14. DOI: 10.1080/15440478.2020.1731909
77. Gudayu A. D., Steuernagel L., Meiners D., and Gideon R. Effect of surface treatment on moisture absorption, thermal, and mechanical properties of sisal fiber // J. Ind. Text. — 2020. — P. 1—21. <https://doi.org/10.1177/1528083720924774>
78. Senthilraja R., Sarala R., Godwin Antony A., and Seshadhri. Effect of acetylation technique on mechanical behavior and durability of palm fibre vinyl-ester composites // Mater. Today Proc. — 2020. — Vol. 21. — P. 634—637.
79. Zaman H. U. and Khan R. A. Acetylation used for natural fiber/polymer composites // J. Thermoplast. Compos. Mater. — 2019. — Vol. 34, No. 1. — P. 3—23.
80. Okpanachi C. B., Agbaji E. B., Mamza P. A. P., and Yaro S. A. Effect of acetylation on the mechanical and water absorption properties of pineapple peel reinforced polypropylene composites // FUDMA Rec. Chem. Sci. — 2020. — Vol. 1, No. 3. — P. 28—35.
81. Pupure L., Varna J., Joffe R., and Pupurs A. An analysis of the nonlinear behavior of lignin-based flax composites // Mech. Compos. Mater. — 2013. — Vol. 49, No. 2. — P. 139—154.
82. Komuraiah A., Kumar N. S., and Prasad B. D. Chemical composition of natural fibers and its influence on their mechanical properties // Mech. Compos. Mater. — 2014. — Vol. 50, No. 3. — P. 359—376.
83. Herrera-Franco P. J. and Valadez-González A. A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composites // Composites: Part B. — 2005. — Vol. 36, No. 8. — P. 597—608.
84. Guleria A., Singha A. S., and Rana R. K. Mechanical, thermal, morphological, and biodegradable studies of okra cellulosic fiber reinforced starch-based biocomposites // Adv. Polym. Technol. — 2018. — Vol. 37, No. 1. — P. 104—112.
85. Dike A. S. Improvement of mechanical and physical performance of poly (lactic acid) biocomposites by application of surface silanization for huntite-hydromagnesite mineral // J. Thermoplast. Compos. Mater. — 2020. <https://doi.org/10.1177/0892705720930776>
86. Dharmalingam S., Meenakshisundaram O., and Kugarajah V. Effect of degree of silanization of luffa on the properties of luffa-epoxy composites // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. — 2020. — Vol. 603 — P. 125273.

87. *Arias J. J. R., Lunz J., Amantes B. D. P., and Marques M. D. F. V.* Synthesis of polypropylene and curauá fiber composites: Towards high performance and low price materials // *Fibers Polym.* — 2020. — Vol. 21, No. 6. — P. 1316—1330.
88. *Messaoudi K., Nekkaa S., and Guessoum M.* Contribution of surface treatments by esterification and silanization in reinforcing the composites based on Pine cone and *Spartium junceum* flours and polypropylene // *J. Adhes. Sci. Technol.* — 2019. — Vol. 33, No. 22. — P. 2405—2429.
89. *Hatipoglu A. and Dike A. S.* Effects of concentration and surface silanization of barite on the mechanical and physical properties of poly(lactic acid)/barite composites // *Polym. Polym. Compos.* — 2020. — Vol. 28, No. 2. — P. 140—148.
90. *Mohd Izwan S., Sapuan S. M., Zuhri M. Y. M., and Mohamed A. R.* Effects of Benzoyl Treatment on NaOH Treated Sugar Palm Fiber: Tensile, Thermal, and Morphological Properties // *J. Mater. Res. Technol.* — 2020. — Vol. 9, No. 3. — P. 5805—5814.
91. *Senthil K. S., Kathiravan S., Ponmariappan M., Yashwhanth S., Akshay S., Hu Y.-Ch., and Hu Y.* Study of raw and chemically treated *Sansevieria ehrenbergii* fibers for brake pad application // *Mater. Res. Express.* — 2020. — Vol. 17, No. 5. — P. 055102.
92. *Nayak S. and Mohanty J. R.* Influence of chemical treatment on tensile strength, water absorption, surface morphology, and thermal analysis of areca sheath fibers // *J. Nat. Fibers.* — 2019. — Vol. 16, No. 4. — P. 589—599.
93. *Jena P. K., Mohanty J. R., and Nayak S.* Effect of surface modification of vetiver fibers on their physical and thermal properties // *J. Nat. Fibers.* — 2020. DOI: 10.1080/15440478.2020.1726249
94. *Qasim U. et al.* Isolation of cellulose from wheat straw using alkaline hydrogen peroxide and acidified sodium chlorite treatments: Comparison of yield and properties // *Adv. Polym. Technol.* — 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/9765950>
95. *Scatolino M. V. et al.* How the surface wettability and modulus of elasticity of the Amazonian paricá nanofibrils films are affected by the chemical changes of the natural fibers // *Eur. J. Wood Wood Prod.* — 2018. — Vol. 76, No. 6. — P. 1581—1594.
96. *de Carvalho Benini K. C. C., Voorwald H. J., and Cioffi M. O. H.* Manufacturing and characterization of high impact polystyrene (HIPS) reinforced with treated sugarcane bagasse // *J. Res. Updat. Polym. Sci.* — 2017. — Vol. 6, No. 1. — P. 2—11.
97. *Halip J. A., Hua L. S., Ashaari Z., Tahir P. M., Chen L. W., and Uyup M. K. A.* Effect of treatment on water absorption behavior of natural fiber-reinforced polymer composites. Ch. 8 // *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites.* — Eds. M. Jawaid, M. Tharig, and N. Saba. — Elsevier Ltd, 2018.
98. *Suwanruji P., Tuechart T., Smitthipong W., and Chollakup R.* Modification of pineapple leaf fiber surfaces with silane and isocyanate for reinforcing thermoplastic // *J. Thermoplast. Compos. Mater.* — 2017. — Vol. 30, No. 10. — P. 1344—1360.
99. *Tayfun U., Dogan M., and Bayramli E.* Investigations of the flax fiber/thermoplastic polyurethane eco-composites: influence of isocyanate modification of flax fiber surface // *Polym. Compos.* — 2017. — Vol. 38, No. 12. — P. 2874—2880.
100. *Hu Q., Yan X., Dong C., and Hu W.* Chemical modifications on linen for unsaturated polyester composites // *Chem. Res. Chinese Univ.* — 2016. — Vol. 32, No. 6. — P. 1057—1062.
101. *Ududua U. O., Monanu M. O., and Chuku L. C.* Proximate analysis and phytochemical profile of *brachystegia eurycoma* leaves // *Asian J. Res. Biochem.* — 2019. — Vol. 4, No. 2. — P. 1—11.
102. *Pickering K. L., Li Y., and Farrell R. L.* Fungal and alkali interfacial modification of hemp fibre reinforced composites // *Key Eng. Mater.* — 2007. — Vols. 334—335, No. 1. — P. 493—496.

103. Sun W., Tajvidi M., Hunt C. G., McIntyre G., and Gardner D. J. Fully bio-based hybrid composites made of wood, fungal mycelium and cellulose nanofibrils // *Sci. Rep.* — 2019. — Vol. 9, No. 1. — P. 1—12.
104. Sathishkumar T. P. Influence of cellulose water absorption on the tensile properties of polyester composites reinforced with *Sansevieria ehrenbergii* fibers // *J. Ind. Text.* — 2014. — Vol. 45, No. 6. — P. 1674—1688.
105. Sood M. and Dwivedi G. Effect of fiber treatment on flexural properties of natural-fiber-reinforced composites: A review // *Egypt. J. Pet.* — 2018. — Vol. 27, No. 4. — P. 775—783.
106. Sari N. H., Sanjay M. R., Arpitha G. R., Pruncu C. I., and Siengchin S. Synthesis and properties of pandanwangi fiber reinforced polyethylene composites: Evaluation of dicumyl peroxide (DCP) effect // *Compos. Commun.* — 2019. — Vol. 15. — P. 53—57.
107. Sabri M. N. I. M., Bakar M. B. A., Masri M. N., and Mohamed M. Effect of chemical treatment on mechanical and physical properties of non-woven kenaf fiber mat reinforced polypropylene biocomposites // *AIP Conf. Proc.* — 2020. — Vol. 2213, No. 1. — P. 020262.
108. Keener T. J., Stuart R. K., and Brown T. K. Maleated coupling agents for natural fibre composites // *Composites: Part A.* — 2004. — Vol. 35, No. 3. — P. 357—362.
109. Tanas F. Modified hemp fibers intended for fiber-reinforced polymer composites used in structural applications. A review I. Methods of modification // *Polymer Compos.* — 2019. — Vol. 41. — P. 1—27.
110. Babji R., Reddy U., Mokshagna, and Shakthivel S. Characteristic Investigation and Comparison between Vetiver fiber-reinforced polypropylene and polyethylene with Coconut shell powder and Maleic anhydride as filler and coupling agents // *Mater. Today Proc.* — 2019. — Vol. 24. — P. 2339—2351.
111. Hamdan M. H. M., Siregar J. P., Rejab M. R. M., Bachtiar D., Jamiluddin J., and Tezara C. Effect of maleated anhydride on mechanical properties of rice husk filler reinforced PLA matrix polymer composite // *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.* — 2019. — Vol. 6, No. 1. — P. 113—124.
112. Maziero R., Soares K., Filho A. I., Franco A. R., and Rubio J. C. C. Maleated polypropylene as coupling agent for polypropylene composites reinforced with eucalyptus and Pinus particles // *BioResources.* — 2019. — Vol. 14, No. 2. — P. 4774—4791.
113. Ravi M., Dubey R. R., Shome A., Guha S., and Anil Kumar C. Effect of surface treatment on natural fibers composite // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* — 2018. — Vol. 376, No. 1.
114. Khalil A. M., El-Nemr K. F., and Hassan M. L. Acrylate-modified gamma-irradiated olive stones waste as a filler for acrylonitrile butadiene rubber/devulcanized rubber composites // *J. Polym. Res.* — 2019. — Vol. 26, No. 249. — P. 3—11.
115. Chen S., Hori N., Kajiyama M., and Takemura A. Compatibilities and properties of poly lactide/poly (methyl acrylate) grafted chicken feather composite: Effects of graft chain length // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2020. — Vol. 137, No. 34. — P. 1—14.
116. Qi R., He C., and Jin Q. Effect of acrylate-styrene-acrylonitrile on the aging properties of eucalyptus/PVC wood-plastic composites // *BioResources.* — 2019. — Vol. 14, No. 4. — P. 9159—9168.
117. Torres F. G. and Cubillas M. L. Study of the interfacial properties of natural fibre reinforced polyethylene // *Polym. Test.* — 2005. — Vol. 24, No. 6. — P. 694—698.
118. Madhu P. et al. Effect of various chemical treatments of prosopis juliflora fibers as composite reinforcement: physicochemical, thermal, mechanical, and morphological properties // *J. Nat. Fibers.* — 2020. — Vol. 17, No. 6. — P. 833—844.

119. Paul A., Joseph K., and Thomas S. Effect of surface treatments on the electrical properties of low-density polyethylene composites reinforced with short sisal fibers // *Compos. Sci. Technol.* — 1997. — Vol. 57, No. 1. — P. 67—79.
120. Zafeiropoulos N. E., Baillie C. A., and Hodgkinson J. M. Engineering and characterisation of the interface in flax fibre/polypropylene composite materials. Part II. The effect of surface treatments on the interface // *Composites: Part A.* — 2002. — Vol. 33, No. 9. — P. 1185—1190.
121. Roy K., Debnath S. C., Tzounis L., Pongwisuthiruchte A., and Potiyaraj P. Effect of various surface treatments on the performance of jute fibers filled natural rubber (NR) composites // *Polymers (Basel).* — 2020. — Vol. 12, No. 369. — P. 2—15.
122. Khan J. A., Khan M. A., and Islam R. Effect of potassium permanganate on mechanical, thermal and degradation characteristics of jute fabric-reinforced polypropylene composite // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2012. — Vol. 31, No. 24. — P. 1725—1736.
123. Zaman H. U., Khan M. A., Khan R. A., Rahman M. A., Das L. R., and Al-Mamun M. Role of potassium permanganate and urea on the improvement of the mechanical properties of jute polypropylene composites // *Fibers Polym.* — 2010. — Vol. 11, No. 3. — P. 455—463.
124. Nayak S. Y., Heckadka S. S., Seth A., and Prabhu S. Effect of chemical treatment on the physical and mechanical properties of flax fibers: A comparative assessment // *Mater. Today Proc.* — 2020. DOI:10.1016/j.matpr.2020.07.380
125. Bledzki A. K., Reihmane S., and Gassan J. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural-fiber composites // *J. Appl. Polym. Sci.* — 1996. — Vol. 59, No. 8. — P. 1329—1336.
126. Nagalakshmaiah M. et al. Biocomposites: present trends and challenges for the future // *Green Composites for Automotive Applications.* — Elsevier, 2019. — P. 197—215.
127. Nassar A. and Nassar E. Effect of fiber orientation on the mechanical properties of multi layers laminate nanocomposites // *Heliyon.* — 2020. — Vol. 6, No. 1. — e03167.
128. Wei L. and McDonald A. G. A review on grafting of biofibers for biocomposites // *Materials (Basel).* — 2016. — Vol. 9, No. 4. — P. 303.
129. Li S., Xiao M., Zheng A., and Xiao H. Cellulose microfibrils grafted with PBA via surface-initiated atom transfer radical polymerization for biocomposite reinforcement // *Biomacromolecules.* — 2011. — Vol. 12, No. 9. — P. 3305—3312.
130. Pickering K. L., Efendy M. G. A., and Le T. M. A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance // *Composites: Part A.* — 2016. — Vol. 83. — P. 98—112.
131. Mori S., Tenazoa C., Candiotti S., Flores E., and Charca S. Assessment of ichu fibers extraction and their use as reinforcement in composite materials // *J. Nat. Fibers.* — 2020. — Vol. 17, No. 5. — P. 700—715.
132. Saheb D. N. and Jog J. P. Natural fiber polymer composites: A review // *J. Adv. Polym. Technol.* — 1999. — Vol. 18, No. 4. — P. 351—363.
133. Arrakhiz F. Z. et al. Mechanical and thermal properties of natural fibers reinforced polymer composites: Doum/low density polyethylene // *Mater. Des.* — 2013. — Vol. 43. — P. 200—205.
134. Rajak D. K., Pagar D. D., Menezes P. L., and Linul E. Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, properties, and applications // *Polymers.* — 2019. — Vol. 11, No. 10. — P. 1667.
135. Isayev A. I. and Modic M. Self-reinforced melt processible polymer composites: Extrusion, compression, and injection molding // *Polym. Compos.* — 1987. — Vol. 8, No. 3. — P. 158—175.

136. *Pokhriyal M., Prasad L., Rakesh P. K., and Raturi H. P.* Influence of fiber loading on physical and mechanical properties of Himalayan nettle fabric reinforced polyester composite // *Mater. Today Proc.* — 2018. — Vol. 5, No. 9. — P.16973—16982.
137. *Jaafar J., Siregar J. P., Tezara C., Hamdan M. H. M., and Rihayat T.* A review of important considerations in the compression molding process of short natural-fiber composites // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2019.— Vol. 105, Nos. 7—8. — P. 3437—3450.
138. *Takashima H., Miyagai K., Hashida T., and Li V. C.* A design approach for the mechanical properties of polypropylene discontinuous fiber reinforced cementitious composites by extrusion molding // *Eng. Fract. Mech.* — 2003. — Vol. 70, Nos. 7—8. — P. 853—870.
139. *Mulinari D. R., Voorwald H. J. C., Cioffi M. O. H., da Silva M. L. C. P., da Cruz T. G., and Saron C.* Sugarcane bagasse cellulose/HDPE composites obtained by extrusion // *Compos. Sci. Technol.* — 2009. — Vol. 69, No. 2. — P. 214—219.
140. *Kaplon E. et al.* Plastic scintillators for positron emission tomography obtained by the bulk polymerization method // *Bio-Algorithms and Med-Systems.* — 2014. — Vol. 10, No. 1. — P. 27—31.
141. *Kassegn E., Desplentere F., and Berhanu T.* Mechanical properties of short sisal fiber reinforced poly lactic acid (PLA) processed by injection molding // *Branna J. Eng. and Technol.* — 2019. — Vol. 1, No. 1. — P. 20—36.
142. *Behzad T. and Sain M.* Finite element modeling of polymer curing in natural-fiber-reinforced composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2007. — Vol. 67, Nos. 7—8. — P. 1666—1673.
143. *McIlhagger A., Archer E., and McIlhagger R.* Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications // *Polym. Compos. Aerosp. Ind.* — 2015. — P. 53—75.
144. *Atas C., Akgun Y., Dagdelen O., Icten B. M., and Sarikanat M.* An experimental investigation on the low velocity impact response of composite plates repaired by VARIM and hand lay-up processes // *Compos. Struct.* — 2011. — Vol. 93, No. 3. — P. 1178—1186.
145. *Saha M., Prabhakaran R., and Waters W. A.* Compressive properties of pultruded composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2000. — Vol. 36, No. 6. — P. 469—474.
146. *Barkanov E., Akishin P., Namsone E., Auzins J., and Morozovs A.* Optimization of pultrusion processes for an industrial application // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 56, No. 6. — P. 697—712.
147. *Vita A., Castorani V., Germani M., and Marconi M.* Comparative life cycle assessment and cost analysis of autoclave and pressure bag molding for producing CFRP components // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2019. — Vol. 105, No. 5. — P. 1967—1982.
148. *Halley P. J.* Rheology of thermosets: the use of chemorheology to characterise and model thermoset flow behavior // *Thermosets.* — Elsevier, 2012. — P. 92—117.
149. *Mbuya T. O., Mwema F. M., and Shagwira H.* *Lightweight Polymer-Nanoparticle-Based Composites.* — CRC Press, 2021.
150. *Salaman A. J., Al-Obaidi A. A., and Takriff M. S.* Enhancing morphology and compression properties of halloysite reinforced polyurethane nanocomposites using injection-moulding technique // *Results Phys.* — 2019. — Vol. 14. — P. 102507.
151. *Averous L. and Le Digabel F.* Properties of biocomposites based on lignocellulosic fillers // *Carbohydr. Polym.* — 2006. — Vol. 66, No. 4. — P. 480—493.
152. *Salih A. A., Zulkifli R., and Azhari C. H.* Tensile properties of single cellulosic bamboo fiber (*Gigantochloa scortechinii*) using response surface methodology // *J. Nat. Fibers.* — 2020. — P. 1—10. <https://doi.org/10.3390/fib8050026>

153. *Nirbhay M., Misra R. K., and Dixit A.* Finite-element analysis of jute- and coir-fiber-reinforced hybrid composite multipanel plates // *Mech. Compos. Mater.* — 2015. — Vol. 51, No. 4. — P. 505—520.
154. *Rayyaan R., Kennon W. R., Potluri P., and Akonda M.* Fibre architecture modification to improve the tensile properties of flax-reinforced composites // *J. Compos. Mater.* — 2020. — Vol. 54, No. 3. — P. 379—395.
155. *Dixit A., Misra R. K., and Mali H. S.* Compression modeling of plain weave textile fabric using finite elements: Druckmodellierung von flächigen Textilgewebestrukturen mit Finiten Elementen // *Materwiss. Werksttech.* — 2014. — Vol. 45, No. 7. — P. 600—610.
156. *Prapavesis A., Tojaga V., Östlund S., and Willem van Vuure A.* Back calculated compressive properties of flax fibers utilizing the Impregnated fiber bundle test (IFBT) // *Composites: Part A.* — 2020. — Vol. 135. — P. 105930.
157. *Bakar M. S. A., Cheang P., and Khor K. A.* Mechanical properties of injection molded hydroxyapatite-polyetheretherketone biocomposites // *Compos. Sci. Technol.* — 2003. — Vol. 63, Nos. 3—4. — P. 421—425.
158. *Kamdem D. P., Jiang H., Cui W., Freed J., and Matuana L. M.* Properties of wood plastic composites made of recycled HDPE and wood flour from CCA-treated wood removed from service // *Composites: Part A.* — 2004. — Vol. 35, No. 3. — P. 347—355.
159. *Harish S., Michael D. P., Bensely A., Lal D. M., and Rajadurai A.* Mechanical property evaluation of natural fiber coir composite // *Mater. Charact.* — 2009. — Vol. 60, No. 1. — P. 44—49.
160. *Boopalan M., Niranjanaa M., and Umapathy M. J.* Study on the mechanical properties and thermal properties of jute and banana fiber reinforced epoxy hybrid composites // *Composites: Part B.* — 2013. — Vol. 51. — P. 54—57.
161. *Rao S., Jayaraman K., and Bhattacharyya D.* Micro and macro analysis of sisal fibre composites hollow core sandwich panels // *Composites: Part B.* — 2012. — Vol. 43, No. 7. — P. 2738—2745.
162. *Rodrigues Junior S. A., Zanchi C. H., de Carvalho R. V., and Demarco F. F.* Flexural strength and modulus of elasticity of different types of resin-based composites // *Braz. Oral Res.* — 2007. — Vol. 21, No. 1. — P. 16—21.
163. *Bachtiar D., Sapuan S. M., Khalina A., Zainudin E. S., and Dahlan K. Z. M.* Flexural and impact properties of chemically treated sugar palm fiber reinforced high impact polystyrene composites // *Fibers Polym.* — 2012. — Vol. 13, No. 7. — P. 894—898.
164. *Giridharan R., Raatan V. S., and Jenarthanam M. P.* Experimental study on effect of fiber length and fiber content on tensile and flexural properties of bamboo fiber/epoxy composite // *Multidiscip. Model. Mater. Struct.* — 2019. — Vol. 15, No. 5. — P. 947—957.
165. *Benkhelladi A., Laouici H., and Bouchoucha A.* Tensile and flexural properties of polymer composites reinforced by flax, jute and sisal fibres // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* — 2020. — Vol. 108, No. 3. — P. 895—916.
166. *Hu R. and Lim J. K.* Fabrication and mechanical properties of completely biodegradable hemp fiber reinforced polylactic acid composites // *J. Compos. Mater.* — 2007. — Vol. 41, No. 13. — P. 1655—1669.
167. *Suharty N. S., Ismail H., Diharjo K., Handayani D. S., and Firdaus M.* Effect of kenaf fiber as a reinforcement on the tensile, flexural strength and impact toughness properties of recycled polypropylene/halloysite composites // *Procedia Chem.* — 2016. — Vol. 19. — P. 253—258.
168. *Punyamurthy R., Sampathkumar D., Ranganagowda R. P. G., Bennehalli B., and Srinivasa C. V.* Mechanical properties of abaca fiber reinforced polypropylene composites: Effect of chemical treatment by benzenediazonium chloride // *J. King Saud Univ. Sci.* — 2017. — Vol. 29, No. 3. — P. 289—294.

169. Reddy M. I., Kumar M. A., and Raju C. R. B. Tensile and flexural properties of jute, pineapple leaf and glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites // *Mater. Today Proc.* — 2018. — Vol. 5, No. 1. — P. 458—462.
170. Haque M., Islam S., Islam S., Islam N., Huque M., and Hasan M. Physicomechanical properties of chemically treated palm fiber reinforced polypropylene composites // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2010. — Vol. 29, No. 11. — P. 1734—1742.
171. Dittenber D. B. and Gangarao H. V. S. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure // *Composites: Part A.* — 2012. — Vol. 43. — P. 81419—1429.
172. D2344/D2344M-13, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates, ASTM Int. — West Conshohocken, PA, 2013.
173. Sathish S., Kumaresan K., Prabhu L., and Gokulkumar S. Experimental investigation of mechanical and FTIR analysis of flax fiber/epoxy composites incorporating SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and graphite // *Rev. Rom. Mater.* — 2018. — Vol. 48, No. 4. — P. 476.
174. Ramesh M., Dhilip J. D. J., Akilan S., Ganeshprasad B., and Shankar G. H. Influence of stacking sequence on mechanical and thermal characteristics of banana-pineapple fiber reinforced epoxy composites // *J. Nat. Fibers.* — 2020. DOI: 10.1080/15440478.2020.1848734
175. Heckadka S. S., Ballambat R. P., Manjeshwar V. K., Ravindranath V., Hegde P., and Kamath A. Cone beam computed tomography for mechanical characterization of Flax/Jute/Ultra high molecular weight polyethylene reinforced phenol formaldehyde composites: A comparative assessment // *Mater. Today Proc.* — (2021). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.124>
176. Kumar M., Jena H., Surekha B., and Sahoo S. Study of mechanical property of cenosphere and clamshell as filler material in jute epoxy composite // *Advances in Materials and Manufacturing Engineering.* — Springer, 2020. — P. 607—615.
177. Mahboob Z. and Bougherara H. Fatigue of flax-epoxy and other plant fibre composites: Critical review and analysis // *Composites: Part A.* — 2018. — Vol. 109. — P. 440—462.
178. Shah D. U., Schubel P. J., Clifford M. J., and Licence P. Fatigue life evaluation of aligned plant fibre composites through S - N curves and constant-life diagrams // *Compos. Sci. Technol.* — 2013. — Vol. 74. — P. 139—149.
179. Sodoke F. K., Toubal L., and Laperrière L. Hygrothermal effects on fatigue behavior of quasi-isotropic flax/epoxy composites using principal component analysis // *J. Mater. Sci.* — 2016. — Vol. 51, No. 24. — P. 10793—10805.
180. El Sawi I., Fawaz Z., Zitoune R., and Bougherara H. An investigation of the damage mechanisms and fatigue life diagrams of flax fiber-reinforced polymer laminates // *J. Mater. Sci.* — 2014. — Vol. 49, No. 5. — P. 2338—2346.
181. Towo A. N. and Ansell M. P. Fatigue of sisal fibre reinforced composites: Constant-life diagrams and hysteresis loop capture // *Compos. Sci. Technol.* — 2008. — Vol. 68, Nos. 3—4. — P. 915—924.
182. Gao D. Y., Yao W. X., Wen W. D., and Huang J. Equivalent spectral method to estimate the fatigue life of composite laminates under random vibration loadings // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 57, No. 1. — P. 101—114.
183. Siengchin S. and Wongmanee S. Mechanical and impact properties of PLA/2× 2 twill and 4× 4 hopsack weave flax textile composites produced by the interval hot pressing technique // *Mech. Compos. Mater.* — 2014. — Vol. 50, No. 3. — P. 387—394.
184. Chandrasekar M., Ishak M. R., Jawaaid M., Sapuan S. M., and Leman Z. Low velocity impact properties of natural fiber-reinforced composite materials for aeronautical

applications // *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. — Elsevier, 2018. — P. 293—313.

185. Wang A., Wang X., and Xian G. Mechanical, low-velocity impact, and hydro-thermal aging properties of flax/carbon hybrid composite plates // *Polym. Test*. — 2020. — Vol. 90. — P. 106759.

186. Soto A. A. R., Rivera J. L. V., Borges L. M. S. A., and Ruiz J. E. P. Tensile, impact, and thermal properties of an epoxy/epoxy matrix composites with cuban henequen fibers // *Mech. Compos. Mater.* — 2018. — Vol. 54, No. 3. — P. 341—348.

187. Militello C., Bongiorno F., Epasto G., and Zuccarello B. Low-velocity impact behavior of green epoxy biocomposite laminates reinforced by sisal fibers // *Compos. Struct.* — 2020. — Vol. 253. — P. 112744.

188. Sarasini F. et al. Drop-weight impact behavior of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites // *Composites: Part B*. — 2014. — Vol. 59. — P. 204—220.

189. Caprino G., Carrino L., Durante M., Langella A., and Lopresto V. Low impact behavior of hemp fibre reinforced epoxy composites // *Compos. Struct.* — 2015. — Vol. 13. — P. 892—901.

190. Dhakal H. N., Zhang Z. Y., Richardson M. O. W., and Errajhi O. A. Z. The low velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites // *Compos. Struct.* — 2007. — Vol. 81, No. 4. — P. 559—567.

191. Feldmann M. and Verheyen F. Impact behavior of continuous biaxial reinforced composites based on bio-polyamides and man-made cellulose fibres // *Int. Polym. Process.* — 2016. — Vol. 31, No. 2. — P. 198—206.

192. Sarasini F. et al. Damage tolerance of carbon/flax hybrid composites subjected to low velocity impact // *Composites: Part B*. — 2016. — Vol. 91. — P. 144—153.

193. Živković I., Fragassa C., Pavlović A., and Brugo T. Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber reinforced green composites // *Composites: Part B*. — 2017. — Vol. 111. — P. 148—164.

194. Fragassa C., Pavlovic A., and Santulli C. Mechanical and impact characterisation of flax and basalt fiber vinylester composites and their hybrids // *Composites: Part B*. — 2018. — Vol. 137. — P. 247—259.

195. Ahmed K. S., Vijayarangan S., and Kumar A. Low velocity impact damage characterization of woven jute—glass fabric reinforced isothalic polyester hybrid composites // *J. Reinf. Plast. Compos.* — 2007. — Vol. 26, No. 10. — P. 959—976.

196. Nurazzi N. M. et al. A review on natural-fiber-reinforced polymer composite for bullet proof and ballistic applications // *Polymers (Basel)*. — 2021. — Vol. 13, No. 4. — P. 646.

197. de O. Braga F., Bolzan L. T., Ramos F. J. H. T. V., Monteiro S. N., Lima É. P., and da Silva L. C. Ballistic efficiency of multilayered armor systems with sisal fiber polyester composites // *Mater. Res.* — 2018. — Vol. 20. — P. 767—774.

198. da Luz F. S., da C. Garcia Filho F., Oliveira M. S., Nascimento L. F. C., and Monteiro S. N. Composites with natural fibers and conventional materials applied in a hard armor: A comparison // *Polymers (Basel)*. — 2020. — Vol. 12, No. 9. — P. 1920.

199. Daoud H., El Mahi A., Rebiere J.-L., Taktak M., and Haddar M. Characterization of the vibrational behavior of flax fibre reinforced composites with an interleaved natural viscoelastic layer // *Appl. Acoust.* — 2017. — Vol. 128. — P. 23—31.

200. Kumar K. S., Siva I., Rajini N., Jappes J. T. W., and Amico S. C. Layering pattern effects on vibrational behavior of coconut sheath/banana fiber hybrid composites // *Mater. Des.* — 2016. — Vol. 90. — P. 795—803.

201. *Arvinda Pandian C. K. and Siddhi Jailani H.* Dynamic and vibrational characterization of natural fabrics incorporated hybrid composites using industrial waste silica fumes // *Int. J. Polym. Anal. Charact.* — 2019. — Vol. 24, No. 8. — P. 721—730.
202. *Munde Y. S., Ingle R. B., and Siva I.* Investigation to appraise the vibration and damping characteristics of coir fibre reinforced polypropylene composites // *Adv. Mater. Process. Technol.* — 2018. — Vol. 4, No. 4. — P. 639—650.
203. *Saba N., Jawaid M., Alothman O. Y., and Paridah M. T.* A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites // *Constr. Build. Mater.* — 2016. — Vol. 106. — P. 149—159.
204. *Ahmad M. A. A., Majid M. S. A., Ridzuan M. J. M., Mazlee M. N., and Gibson A. G.* Dynamic mechanical analysis and effects of moisture on mechanical properties of interwoven hemp/polyethylene terephthalate (PET) hybrid composites // *Constr. Build. Mater.* — 2018. — Vol. 179. — P. 265—276.
205. *da Luz F. S., Monteiro S. N., and Tommasini F. J.* Evaluation of dynamic mechanical properties of PALF and coir fiber reinforcing epoxy composites // *Mater. Res.* — 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1108>
206. *Sahu P. and Gupta M. K.* Dynamic mechanical properties of a biocomposite reinforced with sodiumbicarbonate-treated sisal fibers at different frequencies // *Mech. Compos. Mater.* — 2021. — Vol. 57, No. 1. — P. 81—90.
207. *Saba N. and Jawaid M.* A review on thermomechanical properties of polymers and fibers reinforced polymer composites // *J. Ind. Eng. Chem.* — 2018. — Vol. 67. — P. 1—11.
208. *Espert A., Camacho W., and Karlson S.* Thermal and thermomechanical properties of biocomposites made from modified recycled cellulose and recycled polypropylene // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2003. — Vol. 89, No. 9. — P. 2353—2360.
209. *Hasan K. M. F., Horváth P. G., Kóczán Z., and Alpár T.* Thermo-mechanical properties of pretreated coir fiber and fibrous chips reinforced multilayered composites // *Sci. Rep.* — 2021. — Vol. 11, No. 1. — P. 1—13.
210. *Aliotta L., Gigante V., Coltelli M.-B., Cinelli P., Lazzeri A., and Seggiani M.* Thermo-mechanical properties of PLA/short flax fiber biocomposites // *Appl. Sci.* — 2019. — Vol. 9, No. 18. — P. 3797.
211. *Alvarez V. A., Kenny J. M., and Vázquez A.* Creep behavior of biocomposites based on sisal fiber reinforced cellulose derivatives/starch blends // *Polym. Compos.* — 2004. — Vol. 25, No. 3. — P. 280—288.
212. *Anand A., Banerjee P., Prusty R. K., and Ray B. C.* Lifetime prediction of nano-silica based glass fibre/epoxy composite by time temperature superposition principle // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. and Eng.* — 2018. — Vol. 338, No. 1. — P. 12020.
213. *McKeen L. W.* *The Effect of Creep and Other Time Related Factors on Plastics and Elastomers.* — Elsevier, 2009.
214. *Ghorbani J., Daghigh V., Rahmati S., Mahdian M., and Daghigh H.* Creep behavior of latania natural fiber-reinforced epoxy composites at elevated temperatures // *Polym. Compos.* — 2021. DOI:10.1002/pc.26041
215. *Sala B., Gabrion X., Trivaudey F., Guicheret-Retel V., and Placet V.* Influence of the stress level and hygrothermal conditions on the creep/recovery behavior of high-grade flax and hemp fibre reinforced GreenPoxy matrix composites // *Composites: Part A.* — 2021. — Vol. 141. — P. 106204.
216. *Stochioiu C., Gheorghiu H.-M., and Flavia-Petruta-Georgiana A.* Visco-elasto-plastic characterization of a flax-fiber reinforced biocomposite // *Mater. Plast.* — 2021. — Vol. 58, No. 1. — P. 78—84.

217. *da Silva Junior I. B., de Souza L. M. S., and de Andrade Silva F.* Creep of pre-cracked sisal fiber reinforced cement based composites // *Constr. Build. Mater.* — 2021. — Vol. 293. — P. 123511.
218. *Yang T.-C., Wu T.-L., Hung K.-C., Chen Y.-L., and Wu J.-H.* Mechanical properties and extended creep behavior of bamboo fiber reinforced recycled poly(lactic acid) composites using the time-temperature superposition principle // *Constr. Build. Mater.* — 2015. — Vol. 93. — P. 558—563.
219. *Asyraf M. R. M., Ishak M. R., Sapuan S. M., and Yidris N.* Conceptual design of multi-operation outdoor flexural creep test rig using hybrid concurrent engineering approach // *J. Mater. Res. Technol.* — 2020. — Vol. 9, No. 2. — P. 2357—2368.
220. *Hamma A., Kaci M., Ishak Z. A. M., and Pegoretti A.* Starch-grafted-polypropylene/kenaf fibres composites. Part 1: Mechanical performances and viscoelastic behavior // *Composites: Part A.* — 2014. — Vol. 56. — P. 328—335.
221. *Siengchin S.* Reinforced flax mat/modified polylactide (PLA) composites: impact, thermal, and mechanical properties // *Mech. Compos. Mater.* — 2014. — Vol. 50, No. 2. — P. 257—266.
222. *Durante M., Formisano A., Boccarusso L., Langella A., and Carrino L.* Creep behavior of polylactic acid reinforced by woven hemp fabric // *Composites: Part B.* — 2017. — Vol. 124. — P. 16—22.
223. *Dwivedi S. P., Dixit A., and Bajaj R.* Development of bio-composite material by utilizing chrome containing leather waste with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic particles // *Mater. Res. Express.* — 2019. — Vol. 6, No. 10. — P. 105105.
224. *Fiore V., Scalici T., and Valenza A.* Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax L.* as potential reinforcement of polymer composites // *Carbohydr. Polym.* — 2014. — Vol. 106, No. 1. — P. 77—83.
225. *Ramesh M., Palanikumar K., and Reddy K. H.* Mechanical property evaluation of sisal-jute-glass fiber reinforced polyester composites // *Composites: Part B.* — 2013. — Vol. 48. — P. 1—9.
226. *Sumesh K. R., Kanthavel K., and Kavimani V.* Peanut oil cake-derived cellulose fiber: Extraction, application of mechanical and thermal properties in pineapple/flax natural-fiber composites // *Int. J. Biol. Macromol.* — 2020. — Vol. 150. — P. 775—785.
227. *Liu K., Takagi H., Osugi R., and Yang Z.* Effect of lumen size on the effective transverse thermal conductivity of unidirectional natural-fiber composites // *Compos. Sci. Technol.* — 2012. — Vol. 72, No. 5. — P. 633—639.
228. *Coats A. W. and Redfern J. P.* Thermogravimetric analysis. A review // *Analyst.* — 1963. — Vol. 88, No. 1053. — P. 906—924.
229. *Elkhaoulani A., Arrakhiz F. Z., Benmoussa K., Bouhfid R., and Qaiss A.* Mechanical and thermal properties of polymer composite based on natural fibers: Moroccan hemp fibers/polypropylene // *Mater. Des.* — 2013. — Vol. 49. — P. 203—208.
230. *Nestore O., Kajaks J., Vancovicha I., and Reihmane S.* Physical and mechanical properties of composites based on a linear low-density polyethylene (LLDPE) and natural fiber waste // *Mech. Compos. Mater.* — 2013. — Vol. 48, No. 6. — P. 619—628.
231. *Johri N., Mishra R., and Thakur H.* Synthesis and characterization of jute-and chicken-feather-fiber-reinforced polymer hybrid composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2019. — Vol. 54, No. 6. — P. 821—832.
232. *Gironès J., López J. P., Mutjé P., Carvalho A. J. F., Curvelo A. A. S., and Vilaseca F.* Natural fiber-reinforced thermoplastic starch composites obtained by melt processing // *Compos. Sci. Technol.* — 2012. — Vol. 72, No. 7. — P. 858—863.

233. *Modniks J., Poriķe E., Andersons J., and Joffe R.* Evaluation of the apparent interfacial shear strength in short-flax-fiber/PP composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2012. — Vol. 48, No. 5. — P. 571—578.
234. *Xu Z. H. and Kong Z. N.* Mechanical and thermal properties of short-coirfiber-reinforced natural rubber/polyethylene composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2014. — Vol. 50, No. 3. — P. 353—358.
235. *Baghaei B., Skrifvars M., and Berglin L.* Characterization of thermoplastic natural fibre composites made from woven hybrid yarn prepregs with different weave pattern // *Composites: Part A.* — 2015. — Vol. 76. — P. 154—161.
236. *Dobah Y., Bouchak M., Bezazi A., Belaadi A., and Scarpa F.* Multi-axial mechanical characterization of jute fiber/polyester composite materials // *Composites: Part B.* — 2016. — Vol. 90. — P. 450—456.
237. *Jawaid M., Abdul Khalil H. P. S., and Abu Bakar A.* Woven hybrid composites: Tensile and flexural properties of oil palm-woven jute fibres based epoxy composites // *Mater. Sci. Eng. A.* — 2011. — Vol. 528, No. 15. — P. 5190—5195.
238. *Milanese A. C., M. Cioffi O. H., Jacobus H., and Voorwald C.* Mechanical behavior of natural-fiber composites // *Procedia Eng.* — 2011. — Vol. 10. — P. 2022—2027.
239. *Song J., Mun S., and Kim C.* Mechanical properties of sisal natural-fiber composites according to strain rate and absorption ratio // *Polym. Compos.* — 2011. — Vol. 32, No. 8. — P. 1174—1180.
240. *Martins M. A., Pessoa J. D. C., Gonçalves P. S., Souza F. I., and Mattoso L. H. C.* Thermal and mechanical properties of the açai fiber/natural rubber composites // *J. Mater. Sci.* — 2008. — Vol. 43, No. 19. — P. 6531—6538.
241. *Chin S. C., Tee K. F., Tong F. S., Ong H. R., and Gimbin J.* Thermal and mechanical properties of bamboo fiber reinforced composites // *Mater. Today Commun.* — 2020. — Vol., Sept. — P.100876.
242. *Sanjay M. R., Madhu P., Jawaid M., Senthamaraiannan P., Senthil S., and Pradeep S.* Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review // *J. Cleaner Production.* — 2018. — Vol. 172. — P. 566—581.
243. *Wróbel-Kwiatkowska M., Kropiwnicki M., and Rymowicz W.* Green biodegradable composites based on natural fibers // *Thakur V., Thakur M., and Kessel M.* (eds.) *Handbook of Composites from Renewable Materials.* — Scrivener Publ. LLC, 2017. — P. 283—301.
244. *Samariha A., Bastani A., Nemati M., Kiaei M., Nosrati H., and Farsi M.* Investigation of the mechanical properties of bagasse flour/polypropylene composites // *Mech. Compos. Mater.* — 2013. — Vol. 49, No. 4. — P. 447—454.
245. *Panthapulakkal S. and Sain M.* Injection-molded short hemp fiber/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites. Mechanical, water absorption and thermal properties // *J. Appl. Polym. Sci.* — 2007. — Vol. 103, No. 4. — P. 2432—2441.
246. *Hanan F., Jawaid M., and Tahir P. M.* Mechanical performance of oil palm/kenaf fiber-reinforced epoxy-based bilayer hybrid composites // *J. Nat. Fibers.* — 2018. <https://doi.org/10.1080/15440478.2018.1477083>
247. *Chukov D., Nematulloev S., Zadorozhnyy M., Tcherdyntsev V., Stepashkin A., and Zherebtsov D.* Structure, mechanical and thermal properties of polyphenylene sulfide and polysulfone impregnated carbon fiber composites // *Polymers (Basel).* — 2019. — Vol. 11, No. 4. — P. 684.
248. *Zagho M. M., Hussein E. A., and Elzatahry A. A.* Recent overviews in functional polymer composites for biomedical applications // *Polymers (Basel).* — 2018. — Vol. 10, No. 7. — P. 739.

249. *Scaffaro R., Maio A., and Lopresti F.* Physical properties of green composites based on poly-lactic acid or Mater-Bi<sup>®</sup> filled with *Posidonia Oceanica* leaves // *Composites: Part A.* — 2018. — Vol. 112. — P. 315—327.

250. *Linul E., Vălean C., and Linul P.-A.* Compressive behavior of aluminum micro-fibers reinforced semi-rigid polyurethane foams // *Polymers (Basel)*, — 2018. — Vol. 10, No. 12. — P. 1298.

251. *Chukov D., Nematulloev S., Torokhov V., Stepashkin A., Sherif G., and Tcherdyntsev V.* Effect of carbon fiber surface modification on their interfacial interaction with polysulfone // *Results Phys.* — 2019. — Vol. 15. — P. 102634.

Поступила в редакцию 21.10.2020

Окончательный вариант поступил 19.08.2021

Received Oct. 21, 2020 (Aug. 19, 2021)

---