СТАТЬИ

УДК 539.4+539.3

ПОЛУЧЕНИЕ МНОГОСЛОЙНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН

Айдаралиев Ж.К., Абдиев М.С., Исманов Ю.Х.

Киргизский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, Бишкек, e-mail: i_yusupjan@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы создания композитов, использующих в качестве арматуры длинные, непрерывные по всей длине конструкции и короткие базальтовые волокна, и на их основе многослойных композиционных материалов. Рассмотрено математическое описание прочностных свойств многослойных композиционных материалов, созданных на основе слоев композитов, использующих в качестве арматуры длинные, непрерывные по всей длине конструкции и короткие базальтовые волокна. Результаты теоретических исследований показали, что многослойный композиционный материал имеет улучшенные свойства. Первый слой материала, представляющий собой слой арматуры из непрерывных волокон, обеспечивает прочность на растяжение и изгиб. Второй слой композиционного материала обеспечивает теплоизоляционные свойства и прочность на сжатие и деформацию. Этот слой состоит из композита, арматура которого представляет собой короткие волокна. С целью подтверждения теоретических результатов были проведены работы по созданию композитов на основе длинных и коротких базальтовых волокон. Для получения рубленого короткого волокна была разработана экспериментальная установка. Получен многослойный композиционный материал с улучшенными свойствами на основе длинных и коротких базальтовых волокон. Композитная плита армировалась сеткой, собранной из непрерывных базальтовых волокон.

Ключевые слова: композит, непрерывная фаза, дискретная фаза, рубленое короткое базальтовое волокно, длинное непрерывное базальтовое волокно, многослойный композит

OBTAINING A LAYERED COMPOSITE BASED ON BASALT FIBERS

Aydaraliev Zh.K., Abdiev M.S., Ismanov Yu.Kh.

Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Bishkek, e-mail: i_yusupjan@mail.ru

The article considers the issues of creating composites using long, continuous structures along the entire length of the structure, and short basalt fibers, and, based on them, multilayer composite materials as reinforcement. A mathematical description of the strength properties of multilayer composite materials based on layers of composites using long, continuous along the entire length of the structure, and short basalt fibers as a reinforcement is considered. The results of theoretical studies showed that the multilayer composite material has improved properties. The first layer of material, which is a layer of reinforcement made of continuous fibers, provides tensile and bending strength. The second layer of composite material provides thermal insulation properties and compressive and deformation strength. This layer consists of a composite whose reinforcement is short fibers. In order to confirm the theoretical results, work was carried out to create composites based on long and short basalt fibers. An experimental setup was developed to produce chopped short fiber. A multilayer composite material with improved properties based on long and short basalt fibers is obtained. The composite slab was reinforced with a mesh assembled from continuous basalt fibers.

Keywords: composite, continuous phase, discrete phase, chopped short basalt fiber, long continuous basalt fiber, multilayer composite

Композит – материал, состоящий по меньшей мере из двух компонентов, отделенных друг от друга [1–3]. Сочетая различные составляющие компоненты, можно получить композиционный материал, имеющий свойства, кардинально отличающиеся от свойств каждой из составляющих компонент по отдельности [4–6].

Обобщенный состав композиционного материала можно описать следующим образом [7–9]:

– матрица, которую можно рассматривать как непрерывную фазу (связующий компонент);

– наполнитель представляет собой дискретную фазу (армирующий компонент);

– межфазная граница (между ними протекают следующие физико-химические взаимодействия: адсорбция, десорбция, диффузия и др.) [10–12].

Среди основных типов композитов можно выделить важный класс композиционных материалов, имеющих широкое практическое применение, – многослойные композиты, представляющие собой набор соединенных между собой композитных слоев, одна часть которых армирована длинными и непрерывными волокнами, другая часть короткими минеральными волокнами.

Целью работы являются исследование и разработка метода производства слоистых композиционных систем, армированных

как длинными и непрерывными, так и короткими базальтовыми волокнами.

Материалы и методы исследования

При создании композиционного материала важную роль играют такие важные характеристики наполнителя в матрице, как его концентрация, размер, форма, распределение и ориентация (рис. 1).

С учетом указанных характеристик наполнителя в матрице, можно получить следующие виды композиционных материалов (рис. 2).

Рассмотрим математическое описание многослойного композита.

Если обозначить исследуемую физическую величину композиционного материала как y и предположить, что она зависит от переменных $x_1, x_2,...$, которые подчиняются требованию линейной аддитивности, указанную физическую величину можно представить в виде:

$$y = c_1x_1 + c_2x_2 + ..., \quad (1)$$

где $x_1, x_2,...$ – объемное содержание исходных компонентов композита, $c_1, c_2,...$ – физические характеристики исходных составляющих компонентов композита.

При определении расчетным путем плотности, модуля упругости, предела прочности и других параметров композиционного материала будем пользоваться свойством линейной аддитивности.

Согласно формуле (1) предел прочности композиционного материала, который армирован длинными волокнами (нк), можно представить в виде:

$$\sigma_{нк} = \sigma_{нв}V_{нв} + \sigma_{м1}(1 - V_{нв}), \quad (2)$$

где $\sigma_{нк}$ – прочность композиционного материала, который армирован длинными волокнами, $\sigma_{нв}$ – прочность непрерывного волокна, $V_{нв}$ – объем непрерывного волокна в композите, $\sigma_{м1}$ – прочность связующего компонента (матрицы).

Композиционные материалы, которые армированы базальтовыми короткими волокнами, при деформации ведут себя не так, как композиционные материалы, которые армированы волокнами большой длины [13]. Если длины волокон l незначительно превосходят так называемое критическое значение длины волокна $l_{кр}$, то это отличие особенно заметно. В случае приложения нагрузки, достигающей величины разрыва, к композиционному материалу величина силы натяжения на торцах армирующих волокон, имеющих конечную длину, меньше, чем наибольшие значения силы натяжения в длинных волокнах, используемых для армирования. Для недлинных волокон характерно то, что силы натяжения вдоль волокна изменяются. Силы натяжения на концах стремятся к нулю и имеют наибольшее значение на среднем участке, называемом эффективным участком.

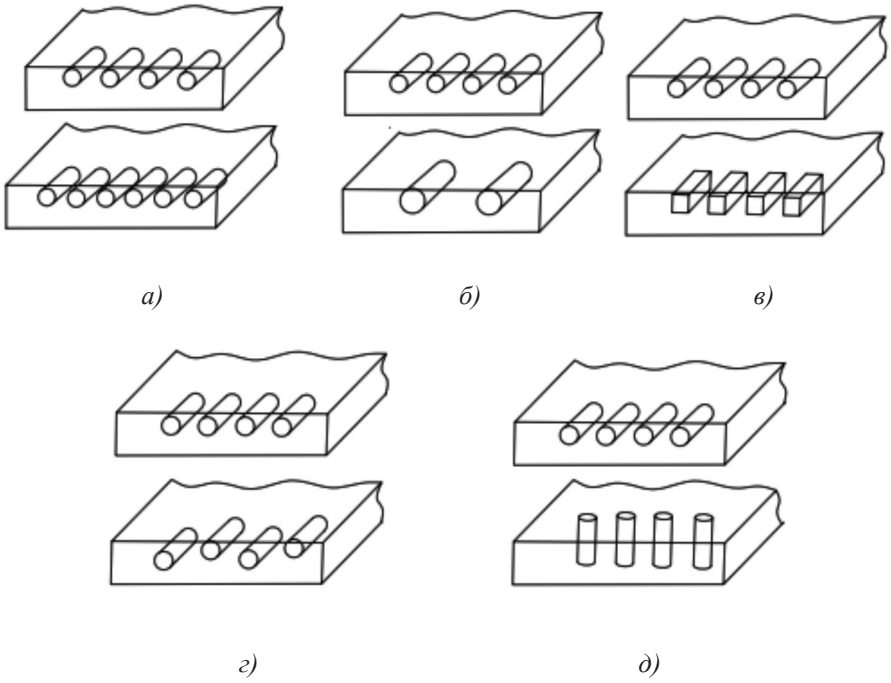

Рис. 1. Наполнитель в матрице: а – концентрация наполнителя; б – размер наполнителя; в – форма наполнителя; г – распределение наполнителя; д – ориентация наполнителя

Объяснить это можно тем, что силы натяжения направлены по касательной вдоль границы взаимодействия волокна матрицы. Критического значения длина волокна достигает, если ее деформация становится достаточно высокой. Уменьшение длины волокна приводит к тому, что волокно перестает деформироваться, а просто вытягивается из матричного слоя. Участки волокна, где силы натяжения падают от значения $\sigma_{кв.мах}$ до нулевого, являются неэффективными. Длина этих участков равна $l_{кр}/2$ (рис. 3).

Зададим характеристику $\beta = S_{кр.}/\sigma_{кв.мах}$. Здесь $S_{кр.}$ – площадь под кривой распределения сил натяжения на длине $l_{кр}/2$ волокна. В этом случае среднее значение сил натяжения $\sigma_{кв.ср.}$ для короткого волокна равно:

$$\sigma_{кв.ср.} = \sigma_{кв.}[1 - (1 - \beta)l_{кр}/l]. \quad (4)$$

Таким образом, максимальное значение прочности композиционного материала, который армирован недлинными волокнами, определяется соотношением:

$$\sigma_{кв.} = [1 - (1 - \beta)l_{кр}/l]\sigma_{кв.}V_{кв.} + \sigma_{м2}V_{м2}. \quad (5)$$

Многослойный композиционный материал, представляющий собой объединение композитов, созданных на основе длинных непрерывных и коротких волокон, работает как единая система. Первый слой композита, созданного на основе непрерывных волокон, работает на растяжение и изгиб, второй слой, созданный на основе коротких волокон, определяет прочностные характеристики при сжатии и деформации. Таким образом, учет их совместного действия приводит к следующему соотношению, определяющему свойства многослойного композита:

$$\sigma_{сл.к.} = \sigma_{нв}V_{нв} + \sigma_{м1}(1 - V_{нв}) + \\ + [1 - (1 - \beta)l_{кр}/l]\sigma_{кв.}V_{кв.} + \sigma_{м2}V_{м2}, \quad (6)$$

где $\sigma_{сл.к.}$ – максимальное значение прочности многослойного композита; $\sigma_{нв}$ – прочность длинного непрерывного волокна; $V_{нв}$ – объем длинного непрерывного волокна; $\sigma_{м1}$ – прочность связующего материала первой матрицы; $\sigma_{кв.}$ – прочность короткого волокна; $\sigma_{м2}$ – прочность связующего материала второй матрицы; $V_{кв.}$ – объем короткого волокна в композите; $V_{м2}$ – объем связующего материала второй матрицы.

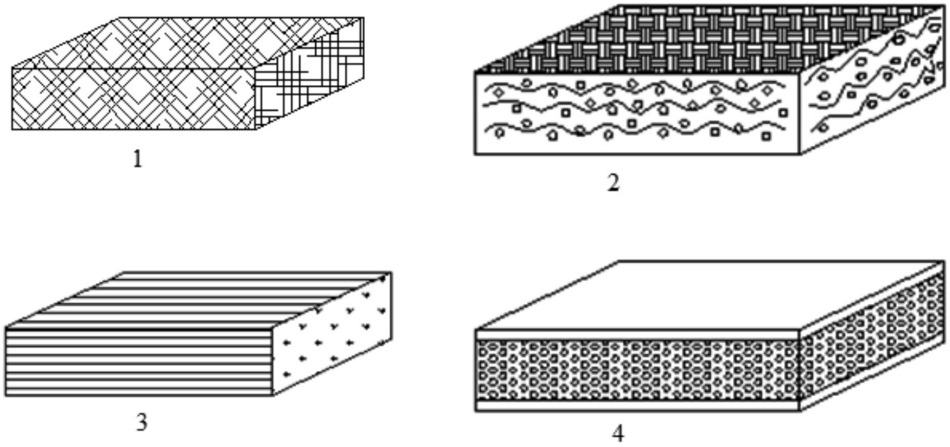

Рис. 2. Армированные композиционные материалы: 1 – короткими волокнами; 2 – длинными непрерывными волокнами; 3 – волокнами во многих направлениях; 4 – многослойный композит на основе непрерывных и коротких волокон

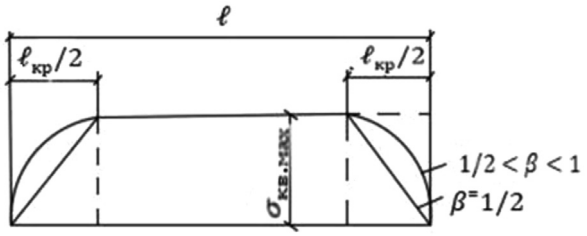

Рис. 3. Эффективные и неэффективные участки длины коротких волокон в композите

Данный композиционный материал имеет улучшенные свойства, обеспечивающие его прочность по отношению к внешней нагрузке любого направления.

При создании слоистого композита в качестве первого компонента была использована теплоизоляционная плита, которая была армирована кусками базальтового волокна. Для производства таких плит была разработана установка для получения кусков из базальтового волокна и дальнейшего равномерного распределения этих кусков в композитной плите (рис. 4). Контроль процесса осуществлялся интерферометрическими методами [14, 15].

Результаты исследования и их обсуждение

Рассмотренная выше установка обеспечивала однородное распределение рубленых базальтовых волокон в матрицах с органическим связующим наполнителем. Получаемая композитная плита имела следующие физико-технические характеристики, указанные в табл. 1.

Физико-технические показатели указывают, что данный композит обеспечивает достаточные прочностные характеристики, в том числе характеристику прочности связи слоев. Также обеспечивает теплоизоляцию, так как имеет минимальный коэффициент теплопроводности, удовлетворяющий стандартам теплоизоляционных материалов. Были также проведены исследования деформационных свойств композитной системы на основе рубленого дискретного волокна. График деформации базальтовой плиты приведен на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что при воздействии внешних нагрузок в композите деформация не настолько велика, чтобы разрушать форму композитной плиты.

С целью усиления прочности и устойчивости базальтовых плит на основе рубленого короткого волокна и обеспечения крепления при монтаже была использована базальтовая сетка, полученная на основе базальтового непрерывного волокна. Физико-технические характеристики базальтовой сетки приведены в табл. 2.

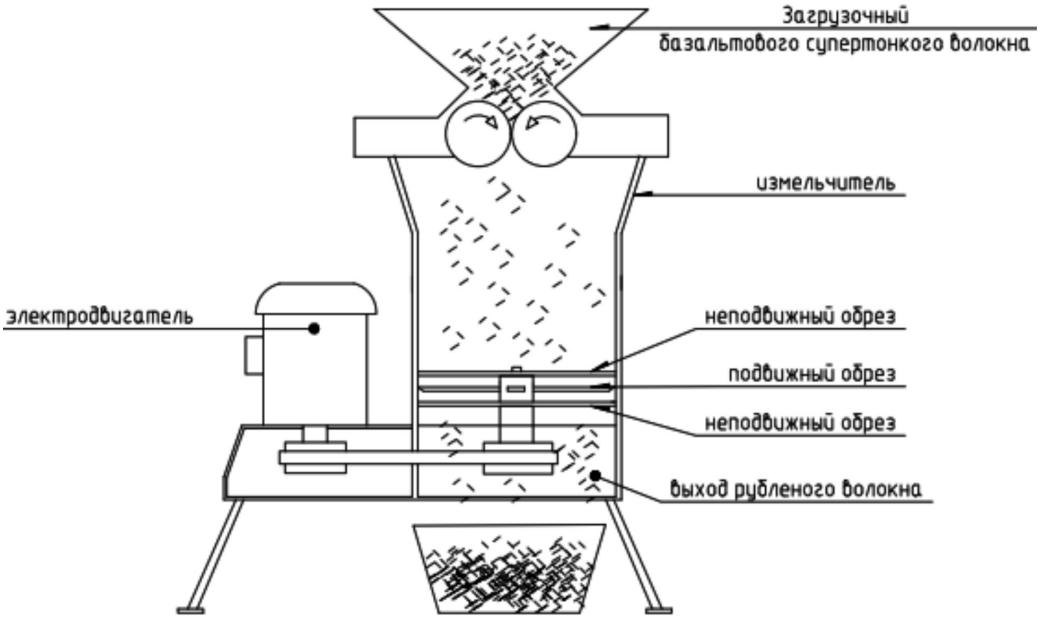

Рис. 4. Установка для получения рубленого базальтового волокна

Таблица 1

Физико-механические характеристики плиты на основе рубленых коротких волокон

№ п/п	Характеристики	Значение
1	Теплопроводность, Вт/мК	0,048
3	Прочностные характеристики при сжатии для значений деформации в 10%, МПа (кгс/см^2)	0,06
4	Адсорбция воды,%	1
5	Характеристика прочности связи слоев, кН/м^2	7

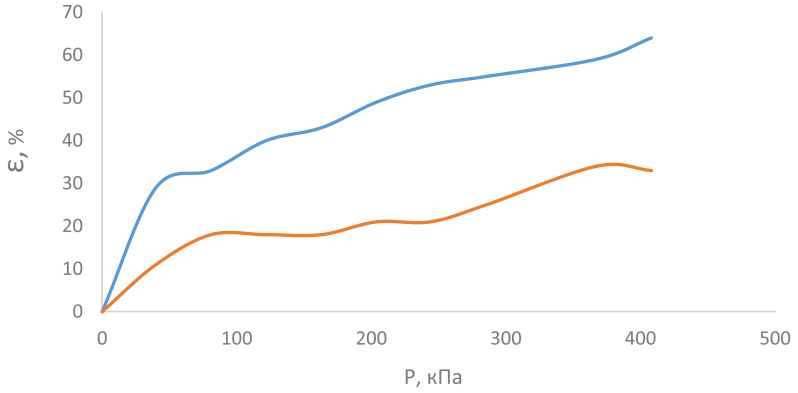

Рис. 5. Полная (штриховая линия) и остаточная (сплошная линия) деформации в зависимости от величины внешнего нагружения

Таблица 2

Физико-технические характеристики базальтовой сетки

№ п/п	Наименование	Величина
1	Разрывная нагрузка	60 кН/м
2	Размер рулона	1×50 м
3	Ячейка	25×25 мм
4	Относительное удлинение, не более	4%

Сетка из базальтовых волокон обладает сравнительно с другими видами сеточных материалов следующими важными преимуществами:

– сетка не коррозируется в нейтральной и агрессивной химической среде;

– значение коэффициента теплопроводности базальтовой сетки в несколько раз ниже, чем металлической;

– обладает малой плотностью и большей прочностью;

– себестоимость ниже, чем у аналогичных материалов.

На основе вышеуказанных компонентов был получен многослойный композит, армированный базальтовой сеткой.

Выводы

1. Теоретически обоснована возможность получения слоистого композиционного материала с улучшенными физико-механическими свойствами.

2. Проведено исследование прочностных и деформационных свойств компонентов слоистого композиционного материала, армированных соответственно длинными непрерывными и короткими базальтовыми волокнами.

3. На основе вышеуказанных компонентов был получен слоистый композит, армированный базальтовой сеткой.

Список литературы

1. Пащенко А.А., Сербин В.П., Паславская А.П., Глуховский В.В., Бирюкович Ю.Л., Солодовник А.Б., Пащенко А.А., Гаша Х., Гросс Р., Грухман Д., Хартман Р., Кеттенхаймер Б., Ландт А., Мейер Г., Саттрасаи М., Ванка Т., Бем Ю.О. Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами. М.: Стройиздат, 1988. 200 с.

2. Ормонбеков Т.О. Прикладные методы расчета конструкции из композиционных материалов. Бишкек: Илим, 1986. 39 с.

3. Колпаков А.Г., Ракин С.И. Деформационные характеристики слоистых композитов при нелинейных деформациях // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 45. № 5. С. 157–166.

4. Кукужданов К.В. Исследование дисперсии упругих волн в композитах на основе двухскоростной модели // Проблемы прочности и пластичности. 2011. Вып. 62. С. 111–118.

5. Трыков Ю.П., Гуревич А.М., Шморгун В.Г. Комплексные технологии получения слоистых композиционных материалов многоцелевого назначения // Автоматическая сварка. 2009. № 11. С. 82–86.

6. Олейников А.И. Оценка жесткости и прочности слоистых композитов // Композиты и наноструктуры. 2017. Т. 9. № 2. С. 77–79.

7. Лурье С.А., Соляев Ю.О., Андрюнина М.А., Лыкова Е.Д. Оптимизация демпирующих характеристик слоистых композитных материалов, содержащих волокна с вязкоупругим покрытием // Вестник ПНИНГУ. 2012. № 3. С. 98–119.

8. Татаринцева О.С., Углова Т.К., Игонин Г.С. и др. Определение сроков эксплуатации базальтоволокнистых теплоизоляционных материалов // Строительные материалы. 2014. № 11. С. 14–15.

9. Веллис С.А., Каминскас А.Л. и др. Теплопроводность влажных стекловолокнистых и минераловатных плит // Строительные материалы. 2012. № 6. С. 38–40.

10. Асланова М.С., Мясников А.А. Влияние химического состава базальтового волокна на его кислотоустойчивость // Стекло и керамика. 2014. № 5. С. 18–22.

11. Айдаралиев Ж.К., Кайназаров А.Т., Исманов Ю.Х., Абдиев М.С., Атырова Р.С., Сопубеков Н.А. Супертонкие волокна на основе алевролита и базальта, добываемых в Кыргызстане // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 5. С. 109–114. DOI: 10.17513/mjpfi.12748.

12. Айдаралиев Ж.К., Исманов Ю.Х., Кайназаров А.Т., Абдиев М.С. Определение оптимального состава материала для изготовления базальтоволокнистых композиционных плит // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 3–2. С. 115–119. DOI 10.17513/snt.37450.

13. Айдаралиев Ж.К., Кайназаров А.Т., Абдиев М.С., Сопубеков Н.А. Разработка технологии получения гипсобазальтовых композитов // Вестник КРСУ. 2019. Т. 19. № 8. С. 103–106.

14. Исманов Ю.Х. Интерферометрия на основе метода бесщелевой радужной голографии // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2015. № 4 (40). С. 194–198.

15. Исманов Ю.Х. Голографическая интерферометрия на основе эффекта Тальбота // Известия Национальной Академии наук Кыргызской Республики. 2015. № 2. С. 20–23.