

УДК 691.3

Мухаметрахимов Рустем Ханифович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Галаутдинов Альберт Радикович

кандидат технических наук, старший преподаватель

E-mail: galautdinov89@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Гарафиев Айнура Маратович

руководитель группы отдела экспертиз и испытаний

E-mail: garafiev93@mail.ru

ООО ПИИ «Центр экспертиз и испытаний в строительстве»

Адрес организации: 420097, Россия, г. Казань, ул. Шмидта, д. 35

Структура и свойства волокнистых композитов на основе модифицированных минеральных вяжущих

Аннотация

Постановка задачи. В настоящее время объемы отечественного производства модифицированных волокнистых композитов на основе минеральных вяжущих имеют тенденцию к снижению, что связано с падением спроса на них ввиду появления на рынке альтернативных материалов, в том числе, зарубежных. Традиционно получаемые волокнистые композиционные материалы и изделия обладают рядом недостатков, таких как значительный удельный вес, невысокие физико-механические характеристики и долговечность, что существенно ограничивает номенклатуру и область их применения. Этим обусловлены значительный интерес к разработке модифицированных волокнистых композиционных материалов на основе минеральных вяжущих, исследование процессов их структурообразования, свойств и совершенствование технологии производства.

Результаты. В работе изучена роль вида армирующих волокон в формировании структуры и свойств композитов на основе цементного и гипсового вяжущих. Показано, что максимальная прочность цементно-волокнистых композитов обеспечивается при степени помола целлюлозных волокон 30-40 °ШР при их содержании в составе матрицы в количестве 5-6 % от массы твердых компонентов, наилучшие показатели достигаются при удельной поверхности кварцевого песка 310 м²/кг. Выявлено, что оптимальный коэффициент фибрового армирования гипсоцементно-пуццолановой матрицы целлюлозными волокнами составляет 0,5-1 % от массы вяжущего при степени помола целлюлозных волокон 30°ШР. На основе анализа микроструктуры исследуемых композитов установлено положительное влияние целлюлозных волокон на структуру и свойства готовых изделий.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности получения волокнистых композитов на основе минеральных вяжущих с повышенными эксплуатационными характеристиками и долговечностью, что позволит расширить область их применения и повысить конкурентоспособность по сравнению с существующими аналогами.

Ключевые слова: строительные материалы, композиционные материалы, дисперсное армирование, минеральные вяжущие, цемент, гипс, структура.

Для цитирования: Мухаметрахимов Р. Х., Галаутдинов А. Р., Гарафиев А. М. Структура и свойства волокнистых композитов на основе модифицированных минеральных вяжущих // Известия КГАСУ. 2020. № 4 (54). С. 62–71.

1. Введение

Производство модифицированных волокнистых композитов на основе минеральных вяжущих является на данный момент одним из перспективных

направлений получения высококачественных и экологически чистых материалов и изделий. Объемы их отечественного производства имеют тенденцию к снижению, что связано с падением спроса ввиду появления на рынке альтернативных материалов. Определенная часть из них в настоящее время ввозится из других стран, используется в качестве облицовочного материала при устройстве навесных вентилируемых фасадов, для облицовки внутренних и наружных стен, для изготовления подоконников, подвесных потолков, межкомнатных перегородок. При этом традиционно получаемые волокнистые композиционные материалы и изделия обладают рядом недостатков: значительным удельным весом, что ограничивает область их применения, невысокими физико-механическими характеристиками и долговечностью.

Направлениями для решения данных недостатков являются: модификация состава матрицы минеральными [1, 2], химическими и комплексными добавками [3-6], наномодификаторами [7, 8]; дисперсное армирование композитов на основе минеральных вяжущих [9-11]; оптимизация технологических режимов производства, которые будут соответствовать требованиям снижения энергоемкости [12-15], материалоемкости и стоимости производства, расширения области их применения, утилизации отходов [16], улучшения экологической обстановки и охраны окружающей среды, а также импортозамещения. Конкурентными преимуществами модифицированных волокнистых композиционных материалов на основе минеральных вяжущих являются их меньший вес, увеличение физико-механических показателей, долговечности и экологичности при одновременном снижении себестоимости получаемой продукции и увеличении конкурентоспособности по сравнению с зарубежными аналогами.

Проблема применения основного низкомарочного строительного сырья – гипсового вяжущего, объемы разведанных запасов которого составляют около половины мировых, ограничена их низкой водостойкостью. Недостатками цементно-волокнистых изделий являются относительно невысокие показатели их стойкости по отношению к внешним воздействиям окружающей среды, что выражается в высоких деформациях усадки/набухания, водопоглощения, низкой морозостойкости и др.

Таким образом, является актуальной разработка модифицированных волокнистых композиционных материалов и изделий на их основе, и исследование процессов их структурообразования, свойств, а также совершенствование технологии производства, что позволит повысить эксплуатационные свойства и долговечность, расширить область применения, сохранить положительные свойства и устранить существующие недостатки.

Эксплуатационные характеристики волокнистых композитов на основе минеральных вяжущих обуславливаются их плотностью, прочностью сцепления минеральной матрицы с волокном, содержанием волокна и степенью их распушки. Все эти факторы необходимо регулировать в технологическом процессе производства изделий. Возможны две причины разрушения волокнистых композитов (рис. 1):

- разрыв фибрового волокна, если превышено его сопротивление растяжению, равное: $\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot R_{a.p.}$;
- выдергивание волокна из матрицы, когда превышено сопротивление сдвигу, равное: $\frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot \tau}{2}$.

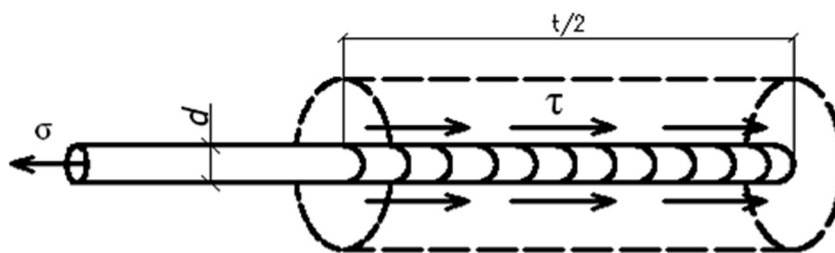


Рис. 1. Схема механического взаимодействия волокна и матрицы
(Берней, И.И. Технология асбестоцементных изделий: учеб. для вузов/
И.И. Берней, В.М. Колбасов. – М. : Стройиздат, 1985. – 400 с.)

Условие одинакового сопротивления волокна растяжению и сдвигу приводит, согласно теоретическим исследованиям прочности П.Н. Соколова, к формированию математической зависимости между длиной волокна и его диаметром следующего вида:

$$\frac{l}{d_{\text{крит}}} = \frac{R_{a.p.}}{2 \cdot \tau}, \text{ где } R_{a.p.} - \text{предел прочности при растяжении; } \tau - \text{предел прочности}$$

исследуемого типа волокон при воздействии сдвиговой нагрузки.

Анализ приведенной выше зависимости позволяет заключить, что увеличение возможности использования коротких волокон, у которых отношение длины к диаметру невелико, возможно при возрастании сил сцепления волокон с матрицей. При высокой степени распушки волокна: $\frac{l}{d} > \left(\frac{l}{d}\right)_{\text{крит}}$, деформации и разрушения композиционного волокнистого материала будут обусловлены разрывом волокон. При низкой степени распушки прочностные показатели волокон будут использоваться не в полной мере. Таким образом, актуальным вопросом является исследование влияния степени распушки целлюлозных волокон на структуру и физико-механические показатели волокнистых композитов (особенно показатели пределов прочности).

Целью настоящей работы является разработка эффективных модифицированных волокнистых композитов на основе минеральных вяжущих (портландцемент и гипс), исследование процессов их структурообразования и свойств для создания тонкостенных облицовочных изделий с повышенными эксплуатационными характеристиками.

В соответствии с поставленной целью на первом этапе экспериментальных исследований рассмотрено влияние вида и содержания армирующих волокон в составе композитов на основе минеральных вяжущих на их физико-механические показатели, определены оптимальные степени распушки волокон и коэффициенты фибрового армирования. На втором этапе рассмотрены особенности формирования микроструктуры модифицированных волокнистых композитов на основе минеральных вяжущих.

2. Материалы и методы

При проведении экспериментальных исследований были использованы следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н Белгородского и Вольского цементных заводов, ЦЕМ II/A-K (Ш-П) 32,5Н Ульяновского цементного завода;
- строительный гипс марки Г6БП производства ООО «Аракчинский гипс»;
- активная минеральная добавка – метакраин с гидравлической активностью не менее 1200 мг/г, выбранный из широкого спектра природных и техногенных АМД на основе выполненных ранее исследований [17, 18] и анализа литературных источников [19];
- мелкий заполнитель – песок Камского месторождения с удельной поверхностью 410, 310, 210, 192 м²/кг;
- вода водопроводная, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732.

Соотношение компонентов в составе сырьевых смесей принято в соответствии с [20, 21]. Модифицирование композиций производили химическими добавками, разработанными ранее, включающими пластифицирующие [22], гидрофобизирующие [23] и флокулирующие [24].

В качестве волокнистого материала использовали хвойную сульфатную небеленую целлюлозу марки НСК-0 предварительно распушенную до 20, 30, 50° ШР. Распушка целлюлозы производилась в дезинтеграторе, позволяющем разделять ее на отдельные волокна без нарушения морфологической структуры, в соответствии с ГОСТ 14363.4-89. Целлюлозные волокна относятся к высокомолекулярным органическим, относительное удлинение при разрыве составляет 0,5-4 %, прочность на растяжение – 300-500 МПа, средний диаметр волокон – 10-35 мкм, длина – 200-1000 мкм и более.

К положительным свойствам целлюлозных волокон можно отнести легкую распушаемость, относительно высокую механическую прочность и гибкость, стойкость к агрессивным средам, биопозитивность, а также способность осаждалась и прочно удерживать на поверхности частицы цементного и гипсового вяжущих, что обусловлено высокой адсорбционной способностью волокон. Армирующие свойства исследуемого типа волокон определяют высокие показатели пределов прочности при изгибе и растяжении, ударной вязкости затвердевшего композита. При этом в конструкциях навесных вентилируемых фасадных систем следует учитывать напряженно-деформированное состояние всей системы, например по методике, изложенной в работе [25]. Коэффициент фибрового

армирования исследуемых композитов оценивали по отношению массы волокнистого материала к массе гипсоцементно-пуццоланового или цементного вяжущего.

Испытания образцов производили по ГОСТ 8747-88, ГОСТ Р 51829-2001. Исследования микроструктуры модифицированных волокнистых композитов на основе минеральных вяжущих производили при помощи растрового сканирующего электронного микроскопа марки «Philips XL-30».

3. Результаты и обсуждение

Зависимости степени помола волокон от времени помолы приведено на рис. 2.

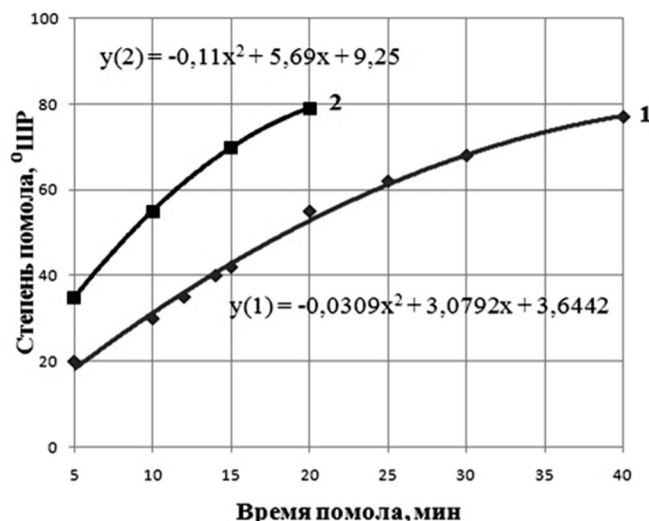


Рис. 2. Зависимости степени помола целлюлозных волокон от времени помолы:
1 – без ПАВ, 2 – с ПАВ (1 % ГП «Одолит-К») (иллюстрация авторов)

Установлено, что существенное влияние на формирование структуры и свойств волокнистых композитов на основе цементного вяжущего оказывает степень помола целлюлозных волокон. Зависимость предела прочности при изгибе цементно-волокнистого композита от степени помола волокна, выражается полиномом второй степени следующего вида:

$$R_{изг} = 0,0125x^2 + 0,885x - 0,8491,$$

согласно которой максимальные показатели достигаются при степени помола целлюлозы равной 30-40 °ШР. Оптимальный коэффициент фибрового армирования цементной матрицы составил 5-6 % от массы вяжущего. При содержании армирующих волокон менее 5 % и более 6 % наблюдается снижение пределов прочности цементно-волокнистых композитов. Следует отметить, что наилучшие показатели пределов прочности при изгибе достигаются в цементно-волокнистых композитах на основе кварцевого песка с удельной поверхностью 310 м²/кг. Дальнейшее увеличение удельной поверхности кварцевого песка существенно повышает энергетические затраты при производстве изделий, обусловленные временем помола при незначительном увеличении прочностных показателей готовой продукции.

Для модифицирования исследуемых дисперсно-армированных целлюлозными волокнами композитов на основе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего принята разработанная ранее комплексная химическая добавка, включающая пластифицирующие и гидрофобизирующие компоненты. Физико-технические характеристики волокон и свойства волокнистых композитов на их основе в значительной мере зависят от степени распушки.

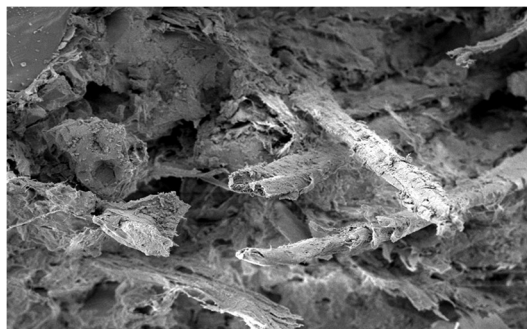
Анализ полученных результатов позволил установить существенное влияние целлюлозных волокон на показатели пределов прочности исследуемых гипсоцементно-пуццолановых композитов. Так, наилучшие показатели достигаются при содержании целлюлозных волокон в составе композитов в количестве 0,5-1 % от массы вяжущего. Снижение показателей прочности при увеличении содержания целлюлозных волокон в составе смеси связано с их комкованием, обуславливающим неравномерное распределение материала в объеме, а также с увеличением требуемого количества воды затворения.

Наилучшие показатели пределов прочности при изгибе и сжатии достигаются при помоле целлюлозных волокон до 30°ШР. Снижение прочностных показателей готовых изделий при увеличении степени помола целлюлозных волокон обусловлено, по мнению авторов, существенным возрастанием их поврежденности при распушке.

Выполненные исследования микроструктуры исследуемых композитов методом растровой сканирующей электронной микроскопии позволили получить электронно-микроскопические снимки при различной степени увеличения, на которых можно наблюдать особенности формирования структуры матриц дисперсно-армированных целлюлозными волокнами (рис. 3-5).



а)

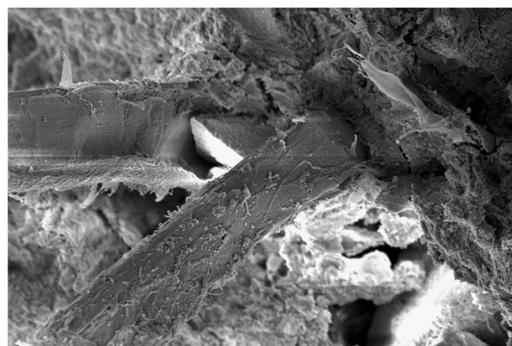


б)

Рис. 3. Электронно-микроскопические снимки волокнистых композитов при увеличении $\times 500$: а) на основе гипсового вяжущего; б) на основе цементного вяжущего (иллюстрация авторов)

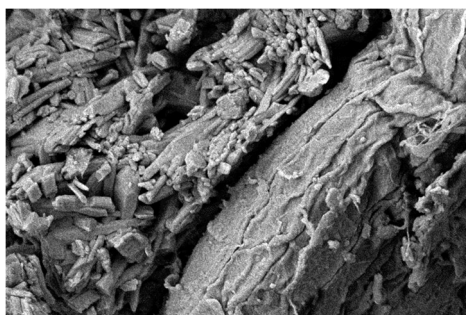


а)

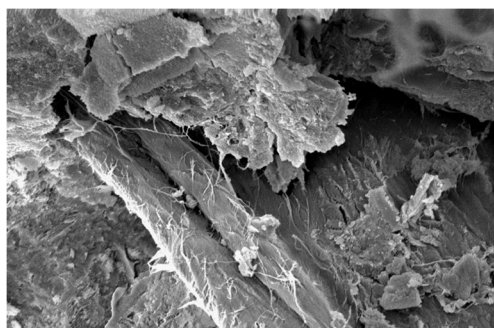


б)

Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки волокнистых композитов при увеличении $\times 1000$: а) на основе гипсового вяжущего; б) на основе цементного вяжущего (иллюстрация авторов)



а)



б)

Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки волокнистых композитов при увеличении $\times 5000$: а) на основе гипсового вяжущего; б) на основе цементного вяжущего (иллюстрация авторов)

Анализ характера распределения волокнистого материала в объеме матрицы на основе изучения макроструктуры на участках излома и электронно-микроскопических снимков свидетельствует об их сравнительно однородном и хаотическом размещении.

Дисперсное армирование исследуемыми волокнами обуславливает повышенные прочностные показатели модифицированных композитов. При этом гидратные новообразования, полученные при модифицировании минеральных вяжущих комплексными химическими добавками, способствуют созданию условий для защиты волокон от агрессивных воздействий окружающей среды и лучшему взаимодействию между волокнами при механических воздействиях.

Анализ рис. 4 при увеличении $\times 1000$ свидетельствует о связанном расположении волокон в матрице исследуемых композитов при отсутствии сетчатого армирования с линейной и плоскостной ориентацией волокон, что обусловлено наличием зон контакта между отдельными волокнами при их расположении и ориентировке в различных плоскостях. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что возрастание прочностных показателей готовых изделий обусловлено равномерным распределением волокон в объеме материала с преобладанием направленно-каркасного армирования с линейной ориентировкой волокон в плоскости композита.

Элементный анализ электронно-микроскопических снимков при увеличении $\times 5000$ (рис. 5) позволил выявить низкоосновные гидросульфаталюминаты кальция с высокой степенью аморфности в виде бесформенных субмикроструктур.

4. Заключение

1. Показано что несмотря на многообразие исследований отечественных и зарубежных ученых, направленных на повышение качества и эффективности композиционных материалов на основе минеральных вяжущих, весьма актуальным является поиск новых путей повышения их эффективности, одним из которых является научно обоснованное технологическое решение получения волокнистых композитов, заключающееся во введении целлюлозных волокон в модифицированную минеральную матрицу, что позволяет значительно упрочнить структуру композита, повысить физико-технические характеристики изделий и упростить технологию их производства.

2. Полученные зависимости прочностных показателей от степени помола исследуемого типа волокон позволили определить его оптимальный интервал, равный $30-40^\circ\text{ШР}$ для цементной матрицы и 30°ШР для гипсовой матрицы, который обеспечивает наибольшее повышение пределов прочности при изгибе модифицированных волокнистых композитов на их основе.

3. Оптимальный коэффициент фибрового армирования целлюлозными волокнами цементной матрицы составил 5-6 %, гипсоцементно-пуццолановой матрицы – 0,5-1 %.

4. Анализ микроструктуры модифицированных волокнистых композитов на основе минеральных вяжущих позволил выявить положительное влияние целлюлозных волокон на структуру и свойства готовых изделий, что обусловлено их оптимальной степенью распушки, сравнительно однородным и хаотическим размещением в объеме модифицированных матриц на основе минеральных вяжущих с преобладанием направленно-каркасного армирования с линейной ориентировкой волокон в плоскости листа.

5. Разработаны эффективные модифицированные волокнистые композиты на основе цементного и гипсового вяжущих с высокими эксплуатационными характеристиками, позволяющими расширить область их применения и повысить конкурентоспособность по сравнению с аналогами.

Список библиографических ссылок

1. Rakhimova N., Rakhimov R. Advances in development of calcined clays as supplementary cementitious materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 890.
2. Khaliullin M., Dimieva A. Composite gypsum binder under introducing thermally activated clay as a pozzolanic component and adding ground limestone // IOP Conference

- Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 890.
3. Khozin V., Khokhryakov O., Nizamov R. A «carbon footprint» of low water demand cements and cement-based concrete // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 890. P. 012105.
 4. Мухаметрахимов Р. Х., Изотов В. С. Повышение физико-механических свойств и долговечности фиброцементных плит на основе целлюлозных волокон // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2012. Vol. 9. № 645. P. 101–107.
 5. Vdovin E., Mavliev L., Stroganov V. Interaction of clay soil components with portland cement and complex additive based on octyltriethoxysilane and sodium hydroxide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. № 890.
 6. Органоминеральный модификатор для фиброцементных композиций: пат. 2500633 Рос. Федерация. №2012118735/03 ; заявл. 04.05.12 ; опубл. 10.12.13. Бюл. № 34. 5 с.
 7. Хозин В. Г., Хохряков О. В., Низамов Р. К., Кашапов Р. Р., Баишев Д. И. Опыт наномодификации цементов низкой водопотребности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. Vol. 1. P. 53–57.
 8. Хозин В. Г., Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К. Общая концентрационная закономерность эффектов наномодифицирования строительных материалов // Строительные материалы. 2015. Vol. 2. P. 25–33.
 9. Манушина А. С., Урбанов А. В., Немцев А. Д., Потапова Е. Н. Влияние волокон на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2016. № 7. P. 66–68.
 10. Изотов В. С., Мухаметрахимов Р. Х., Галаутдинов А. Р. Влияние полипропиленовых волокон на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник Технологического университета. 2015. Vol. 18, № 1. P. 135–137.
 11. Максимов В. Г., Вдовин Е. А., Мавлиев Л. Ф. Исследование влияния эффективности фибрового армирования на цементопесчаную смесь для дорожного строительства // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований. 2015. P. 118–120.
 12. Мухаметрахимов Р. Х. Снижение энергетических затрат при производстве цементно-волокнистых плит для отделки зданий и сооружений // Энергетика Татарстана. 2015. Vol. 39, № 3. P. 51–55.
 13. Изотов В. С., Мухаметрахимов Р. Х., Галаутдинов А. Р. Способ приготовления гипсоцементно-пуццолановой композиции : pat. RU 2552274 C1 USA. RU, 2015.
 14. Pimenov S. I. Features of the structure formation of a cement stone after hydro-mechanochemical activation of cement // Russ. J. Build. Constr. Archit. 2019. Vol. 49, № 3. P. 46–58.
 15. Pimenov S. I. Heavyweight concrete based on hydromechanochemically activated binder // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. № 890. 2020.
 16. Stepanov S., Morozov N., Morozova N., Ayupov D., Makarov D., Baishev D. Efficiency of Use of Galvanic Sludge in Cement Systems // Procedia Engineering. 2016. № 165. P. 1112–1117.
 17. Мухаметрахимов Р. Х., Галаутдинов А. Р. Роль активных минеральных добавок природного происхождения в формировании структуры и свойств гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник технологического университета. 2017. Vol. 6, № 20. P. 60–63.
 18. Мухаметрахимов Р. Х., Галаутдинов А. Р. Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее на основе низкомарочного сырья и отходов промышленности // Вестник Технологического университета. 2016. Vol. 19, № 24. P. 56–59.
 19. Тирони А., Тресса М, Сиан А, Ирассар Э.Ф. Термическая активация каолиновых глин // Цемент и его применение. 2012. Vol. 6. P. 145–148.
 20. Гипсоцементно-пуццолановая композиция : пат. 2551179. Рос. Федерация. № 2014105564/03 ; заявл. 14.02.14 ; опубл. 20.05.15. Бюл. № 14. 6 с.
 21. Фиброцементная смесь : пат. 2486150. Рос. Федерация. № 2012101728/03 ; заявл. 18.01.12 ; опубл. 27.06.13. Бюл. № 18. 6 с.
 22. Комплексная добавка : пат. 2519313. Рос. Федерация. № 2013103948/03 ; заявл. 29.01.13 ; опубл. 10.06.14. Бюл. № 16. 5 с.

23. Mukhametrakhimov R. et al. Water-resistant fiber-reinforced gypsum cement-pozzolan composite // E3S Web of Conferences. 2019.
24. Мухаметрахимов Р. Х. Цементно-волокнистые композиции модифицированные флокулирующими добавками // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. Vol. 73, № 10. P. 28–37.
25. Egorov D., Galyamichev A., Gerasimova E., Serdjuks D. Stress-strain state of fiber cement cladding within curtain wall system // Magazine of Civil Engineering. 2020. 97(5). Article № 9709. DOI: 10.18720/MCE.97.9.

Mukhametrakhimov Rustem Khanifovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: muhametrahimov@mail.ru

Galautdinov Albert Radikovich

candidate of technical sciences, senior lecturer

E-mail: galautdinov89@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Garafiev Ainur Maratovich

team leader of the expertise and testing department

E-mail: garafiev93@mail.ru

LLC PII «Center for Expertise and Testing in Construction»

The organization address: 420097, Russia, Kazan, Schmidta st., 35

Structure and properties of fiber composites based on modified mineral binders

Abstract

Problem statement. Currently, the volume of production of modified fiber composites based on mineral binders tends to decrease, which is associated with a drop in demand for them due to the appearance on the market of alternative materials, including foreign ones. Traditionally obtained fibrous composite materials and products have several disadvantages, such as significant specific gravity, low physical and mechanical characteristics and durability, which significantly limit the range and scope of their application. This raises the significant interest in the development of modified fibrous composite materials based on mineral binders, the study of the processes of their structure formation, properties and improvement of production technology.

Results. The paper studies the role of the reinforcing fiber type in the formation of the structure and properties of composites based on cement and gypsum binders. It is shown that the maximum strength of fiber-cement composites is provided at a degree of grinding of cellulose fibers of 30-40°ShR with their content in the matrix in an amount of 5-6 % of the mass of solid components, the best indicators are achieved with a specific surface of quartz sand of 310 m²/kg. Revealed that the optimal coefficient of fiber reinforcement of a gypsum-cement-pozzolan matrix with cellulose fibers is 0,5-1 % of the binder mass at a degree of grinding of cellulose fibers of 30°ShR. Based on the analysis of the microstructure of the studied composites, established a positive effect of cellulose fibers on the structure and properties of finished products.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry lies in the possibility of obtaining fiber composites based on mineral binders with improved performance characteristics and durability, which will expand the scope of their application and increase their competitiveness in comparison with analogs.

Keywords: building materials, composite materials, dispersed reinforcement, mineral binders, cement, gypsum, structure.

For citation: Mukhametrakhimov R. Kh., Galautdinov A. R., Garafiev A. M. Structure and properties of fiber composites based on modified mineral binders // Izvestija KGASU. 2020. № 4 (54). P. 62–71.

References

1. Rakhimova N., Rakhimov R. Advances in development of calcined clays as supplementary cementitious materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890.
2. Khaliullin M., Dimieva A. Composite gypsum binder under introducing thermally activated clay as a pozzolanic component and adding ground limestone // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890.
3. Khozin V., Khokhryakov O., Nizamov R. A. «Carbon footprint» of low water demand cements and cement-based concrete // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890. P. 012105.
4. Mukhametrahimov R. Kh., Izotov V. S. Improving the physical and mechanical properties and durability of fiber cement boards based on cellulose fibers // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2012. Vol. 9, № 645. P. 101–107.
5. Vdovin E., Mavliev L., Stroganov V. Interaction of clay soil components with portland cement and complex additive based on octyltriethoxysilane and sodium hydroxide // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 890.
6. Organomineral modifier for fiber cement compositions : pat. 2500633 Russian Federation. №2012118735/03 ; declared 04.05.12 ; published 10.12.13. bulletin № 34. 5 p.
7. Khozin V. G., Khokhryakov O. V., Nizamov R. K., Kashapov R. R., Baishev D. I. Experience in nanomodification of cements with low water demand // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2018. Vol. 1. P. 53–57.
8. Khozin V. G., Abdrahmanova L. A., Nizamov R. K. General concentration regularity of the effects of nanomodification of building materials // Stroitel'nye materialy. 2015. Vol. 2. P. 25–33.
9. Manushina A. S., Urbanov A. V., Nemcev A. D., Potapova E. N. Influence of fibers on the properties of gypsum-cement-pozzolanic binder // Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii. 2016. № 7. P. 66–68.
10. Izotov V. S., Mukhametrahimov R. Kh., Galautdinov A. R. The influence of polypropylene fibers on the main properties of gypsum-cement-pozzolanic binder // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2015. Vol. 18, № 1. P. 135–137.
11. Maksimov V. G., Vdovin E. A., Mavliev L. F. Investigation of the effect of the efficiency of fiber reinforcement on a cement-sand mixture for road construction // Aktual'nye napravleniya fundamental'nyh i prikladnyh issledovanij. 2015. P. 118–120.
12. Mukhametrahimov R. Kh. Reducing energy costs in the production of fiber cement boards for finishing buildings and structures // Energetika Tatarstana. 2015. Vol. 39, № 3. P. 51–55.
13. Izotov V. S., Mukhametrahimov R. Kh., Galautdinov A. R. Method for preparing gypsum-cement-pozzolanic composition : pat. RU 2552274 C1. RU, 2015.
14. Pimenov S. I. Features of the structure formation of a cement stone after hydro-mechanochemical activation of cement // Russ. J. Build. Constr. Archit. 2019. Vol. 49, № 3. P. 46–58.
15. Pimenov S. I. Heavyweight concrete based on hydromechanochemically activated binder // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 890. 2020.
16. Stepanov S., Morozov N., Morozova N., Ayupov D., Makarov D., Baishev D. Efficiency of Use of Galvanic Sludge in Cement Systems // Procedia Engineering. 2016. № 165. P. 1112–1117.
17. Mukhametrahimov R. Kh., Galautdinov A. R. The role of active mineral additives of natural origin in the formation of the structure and properties of gypsum-cement-pozzolanic binder // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2017. Vol. 6, № 20. P. 60–63.
18. Mukhametrahimov R. Kh., Galautdinov A. R. Gypsum-cement-pozzolanic binder based on low-grade raw materials and industrial waste // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2016. Vol. 19, № 24. P. 56–59.
19. Tironi A., Tressa M., Sian A., Irassar E. F. Thermal activation of kaolinite clays // Cement i ego primenenie. 2012. Vol. 6. P. 145–148.

20. Gypsum-cement-pozzolanic composition : pat. 2551179. Russian Federation. № 2014105564/03 ; declared 14.02.14 ; published 20.05.15. bulletin № 14. 6 p.
21. Fiber cement mixture : pat. 2486150. Russian Federation. № 2012101728/03 ; declared 18.01.12 ; published 27.06.13. bulletin № 18. 6 p.
22. Complex additive: pat. 2519313. Russian Federation. № 2013103948/03 ; declared 29.01.13 ; published 10.06.14. bulletin № 16. 5 p.
23. Mukhametrakhimov R. et al. Water-resistant fiber-reinforced gypsum cement-pozzolanic composites // E3S Web of Conferences. 2019.
24. Mukhametrahimov R. Kh. Cement-fibrous compositions modified with flocculating additives // Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzhenij. 2018. Vol. 73, № 10. P. 28–37.
25. Egorov D., Galyamichev A., Gerasimova E., Serdjuks D. Stress-strain state of fiber cement cladding within curtain wall system // Magazine of Civil Engineering. 2020. 97(5). Article № 9709. DOI: 10.18720/MCE.97.9.