

factors. The article discusses the ultra-high-efficiency UHPFRC fiber-reinforced cementing composite. Its advantages such as strength, durability, crack resistance and water resistance are analyzed.

Keywords: repair compounds, modified heavy concrete, fiber concrete, composite material, strength, durability, water resistance, UHPFRC, composition optimization, stability of artificial structures.

Об авторах:

ЛАПТЕВ Александр Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва. E-mail: alexandrlaptev908@gmail.com

ТКАЧ Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва. E-mail: ev_tkach@mail.ru

About the authors:

LAPTEV Alexander Alexandrovich – Postgraduate Student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow. E-mail: alexandrlaptev908@gmail.com

TKACH Evgeniya Vladimirovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow. E-mail: ev_tkach@mail.ru

УДК 691.535

РАЗРАБОТКА СОСТАВА КОМПОЗИЦИОННОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

**И.А. Лесников, Т.Б. Новиченкова,
В.Б. Петропавловская, Е.В. Смирнова**

© Лесников И.А., Новиченкова Т.Б.,
Петропавловская В.Б., Смирнова Е.В., 2024

***Аннотация.** В статье представлены результаты разработки композиционного гипсового вяжущего для строительной 3D-печати. Большинство строительных смесей непригодно для использования в строительной 3D-печати, поскольку не обладают достаточной прочностью на сжатие. Композиционные смеси для 3D-печати используют в специальных принтерах, поэтому они должны*

соответствовать определенным требованиям по физико-механическим и эксплуатационным параметрам.

Ключевые слова: композиционное гипсовое вяжущее, 3D-печать, гипсоцементно-пуццолановое вяжущее, добавка мела, доменный шлак, строительная смесь.

Введение

В последние годы 3D-печать становится все более востребованным методом изготовления различных объектов, от прототипов до готовых изделий. Этот процесс позволяет создавать сложные структуры с высокой точностью и детализацией, что можно считать значительным преимуществом по сравнению с традиционными методами производства.

Одним из ключевых элементов 3D-печати является материал, из которого изготавливаются объекты. На сегодняшний день широкое распространение получили смеси на основе композиционных гипсовых вяжущих [1].

Композиционные гипсовые вяжущие представляют собой смесь гипса с добавлением специальных модификаторов, которые улучшают его свойства для 3D-печати. Эти модификаторы могут включать полимеры, стабилизаторы и другие вещества, которые улучшают прочность, эластичность и стойкость к воздействию внешней среды [2].

Одно из основных преимуществ композиционных гипсовых вяжущих – их улучшенная производительность по сравнению с обычными гипсовыми смесями. Они обладают высокой прочностью, что позволяет создавать крупные конструкции без дополнительного усиления, а также сохранять детали и плавные поверхности при печати объектов с высокой точностью и сложной геометрией. Благодаря хорошей адгезии к различным поверхностям, смеси на основе композиционных гипсовых вяжущих обеспечивают прочное соединение между слоями во время процесса печати [3].

Для формирования у материалов необходимых в каждом конкретном случае реологических свойств требуется разработка соответствующих композиционных вяжущих. Под ними подразумевается продукт, который получается при смешивании вяжущей основы и комплекса минеральных и химических добавок [4].

Свойства композиционных вяжущих можно регулировать и изменять под каждую конкретную задачу. Для выбора состава смеси следует уделять особое внимание тому, в какой области она будет применяться. Так, для создания композиционных вяжущих основой может являться портландцемент, гипс и др. В качестве минеральных добавок могут использоваться различные порошковые материалы [5].

Более подходящей разновидностью композиционных гипсовых вяжущих является гипсоцементно-пуццолановое вяжущее. Пуццолановые добавки, которые содержат кремнезем в активной форме, позволяют

уменьшить концентрацию гидроксида кальция, что приводит к снижению рН-среды до уровня, при котором формирующийся гидросульфоалюминат кальция меньше увеличивается в объеме, способствуя уплотнению матрицы, не создавая внутренних напряжений [6].

В ходе проведения испытаний было выявлено, что при добавлении в смесь гипсоцементно-пуццоланового вяжущего (ГЦПВ) небольшого количества технического мела последний активно участвует в процессе гидратации. Подтвердилось и наличие широкого спектра новообразований, способствующих стабильности сформировавшихся структур. Наряду с этим более крупные частицы мела выступают в роли центров кристаллизации и используются как микронаполнитель, благодаря чему улучшаются эксплуатационные характеристики затвердевшей смеси [7].

Однако в связи с тем, что в составе ГЦПВ присутствует большое количество гипса, сроки схватывания не увеличиваются, поэтому для изучения ранних стадий гидратации к ГЦПВ был добавлен суперпластификатор РС-1701. Было установлено, что данный суперпластификатор в количестве 0,1–0,5 % от массы ГЦПВ оказывает комплексное влияние на свойства смеси и затвердевшего ГЦПВ. Так, введение РС-1701 в количестве 0,3 % способствовало более чем двукратному увеличению сроков схватывания смеси, а также некоторому повышению прочности затвердевшего ГЦПВ [8].

Материалы и методы

Целью данной научно-исследовательской работы являлось получение высокопрочных сырьевых смесей для 3D-печати с необходимой удобоукладываемостью, а также со сниженной себестоимостью за счет использования промышленных отходов и недорогих сырьевых материалов. За основу смеси принято ГЦПВ с добавками технического мела.

В качестве вяжущего за основу ГЦПВ были взяты портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108-20 и гипс Г-5 Б II по ГОСТ 125-2018. В качестве пуццолановой добавки применялся доменный шлак, измельченный по ГОСТ 3476-2019. В состав сухой строительной смеси вводились добавка мела с содержанием $\text{CaCO}_3 > 96 \%$ по ГОСТ 12085-88 и суперпластификатор РС-1701.

Доменный шлак дробили в шаровой лабораторной мельнице в течение 45 мин до значения удельной поверхности $1\,000 \text{ м}^2/\text{кг}$. Более тонкий помол является слишком энергозатратным. К тому же высокая дисперсность увеличивает водотвердое отношение. Тонкость помола оценивали по методу Козени – Кармана на приборе ПСХ-11(SP).

В соответствии с матрицей планирования трехфакторного планированного эксперимента типа В-D₁₃ составили смесь из портландцемента, гипса, дробленого доменного шлака, мела и суперпластификатора.

Из растворных смесей по стандартной методике были заформованы образцы-балочки с размерами 40 x 40 x 160 мм. После затвердения в нормальных условиях в возрасте 3 и 7 сут были определены физико-механические свойства полученных образцов по ГОСТ 5802 и ГОСТ 23789-2018.

Результаты исследования

В ходе испытаний образцов в возрасте 3 и 7 сут нормального твердения и обработки планированного эксперимента были выявлены зависимости предела прочности при сжатии образцов от содержания добавок мела и суперпластификатора РС-1701 (табл. 1, 2).

Таблица 1

Матрица планированного эксперимента

№	Гипс, г	Портланд-цемент, г	Шлак, г	Вода, мл	Мел, г	РС-1701, г	Средняя прочность при сжатии, МПа (7 сут)	Средняя плотность, г/см ³
1	530	340	130	200	10	3	45,2	5,6
2	530	340	130	400	10	3	41,6	4,9
3	530	340	130	200	20	3	47,8	6,7
4	530	340	130	400	20	3	43,0	5,2
5	530	340	130	200	10	2	47,2	6,2
6	530	340	130	400	10	2	42,3	5,1
7	530	340	130	200	20	2	44,6	5,5
8	530	340	130	400	20	2	44,3	5,4

Таблица 2

Составы смесей

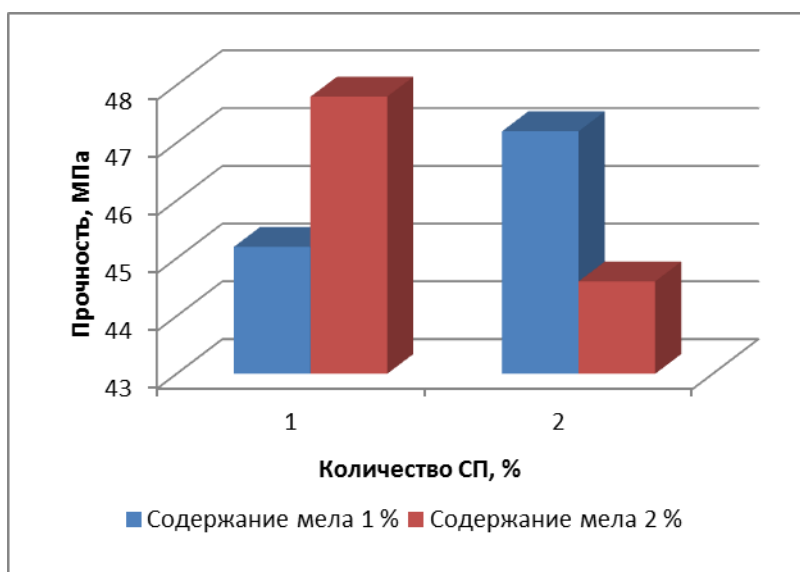
№	x1	x2	x3	X1 (водотвердое отношение)	X2 (мел), %	X3 (С), %
1	-1	-1	+1	0,25	1,0	0,3
2	+1	-1	+1	0,35	1,0	0,3
3	-1	+1	+1	0,25	2,0	0,3
4	+1	+1	+1	0,35	2,0	0,3
5	-1	-1	-1	0,25	1,0	0,2
6	+1	-1	-1	0,35	1,0	0,2
7	-1	+1	-1	0,25	2,0	0,2
8	+1	+1	-1	0,35	2,0	0,2

При введении добавки мела в количестве от 1–2 % от массы ГЦПВ наблюдается прирост прочности образцов. Наиболее большой прирост прочности (до 10 %) приходится на замес с добавкой мела в количестве 2 %, дальнейшее же повышение приводит к незначительному снижению

прочности. На основе статистической обработки данных по полученной регрессионной модели был построен график, отражающий данную зависимость. Мел активно вовлечен в процесс образования связей во время увлажнения. Кроме того, присутствует множество новообразований, которые повышают устойчивость созданных структур. Более крупные частицы также используются в качестве центров кристаллизации и микронаполнителя, увеличивая прочность затвердевшей смеси.

При добавлении суперпластификатора РС-1701 в количестве 0,2–0,3 % наблюдается снижение водотвердого отношения и, как следствие, увеличение плотности образцов (рисунок). При этом за счет снижения водотвердого отношения смесь при затворении водой переходит в вязкопластичное, пастообразное состояние, более подходящее для 3D-печати. Сроки схватывания увеличиваются от 3–5 до 10–15 мин. Затвердевшие образцы, полученные с использованием суперпластификатора, имеют более гладкую поверхность, что уменьшает затраты на их обработку.

Максимальный прирост прочностных характеристик происходит при одновременном внедрении в смесь добавки мела и суперпластификатора РС-1701 в количестве 0,3 % от массы ГЦПВ.



Зависимость прочности образцов от содержания мела и добавки суперпластификатора при водотвердом отношении 0,25

Наилучшие результаты по прочности образцов на сжатие показал состав сухой строительной смеси, содержащий 50,7 % гипса Г-5, 34 % портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н, 13 % доменного шлака, 2 % мела и 0,3 % суперпластификатора РС-1701. Предел прочности при сжатии указанного состава составил в среднем 35, 47 и 64 МПа в возрасте 3, 7 и 28 сут соответственно.

Заключение

Смесь на основе ГЦПВ имеет ряд преимуществ перед аналогами, представленными на рынке. Это повышенные физико-механические свойства, экологическая и экономическая составляющие. Применение данной смеси улучшит рынок строительной 3D-печати за счет получаемых изделий с высокой прочностью, не требующих дополнительной поверхностной обработки. Немаловажным фактором является также доступность всех компонентов, входящих в состав смеси. Данный продукт универсален и может быть использован в других областях строительства, таких как ремонт.

Библиографический список

1. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. 2017. Т. 8. № 1. С. 90–101.
2. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 7 (118). С. 863–876.
3. Подбор составов смеси для 3D печати / Б.А. Бондарев, В.А. Баязов, О.О. Корнеев, И.А. Востриков, А.А. Мещеряков // Вестник Евразийской науки. 2021. Т. 13. № 3. С. 25.
4. Использование кремнеземсодержащих промышленных отходов в технологии композиционных гипсовых вяжущих / И.В. Старостина, Р.О. Ефремов, Е.В. Порожняк, Ю.Л. Старостина, И.Г. Шайхиев // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 13. С. 178–181.
5. Формирование свойств композиций для строительной печати / В.С. Лесовик, М.Ю. Елистраткин, Е.С. Глаголев, С.В. Шаталова, М.С. Стариков // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 6–14.
6. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. М.: Стройиздат, 1986. 464 с.
7. Дребезгова М.Ю. Особенности микростроения затвердевшего КГВ с многокомпонентными минеральными добавками // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 12. С. 136–140.
8. Дребезгова М.Ю. Особенности гидратации композиционного гипсового вяжущего в присутствии суперпластификатора SikaPlast 2135* // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 5. С. 20–22.

DEVELOPMENT OF COMPOSITE GYPSUM BINDER COMPOSITION FOR 3D PRINTING

**I.A. Lesnikov, T.B. Novichenkova,
V.B. Petropavlovskaya, E.V. Smirnova**

***Abstract.** The article presents the results of the development of a composite gypsum binder for 3D construction printing. Most building mixes are unsuitable for use in construction 3D printing because they do not have sufficient compressive strength. Composite mixtures for 3D printing are used in special printers, therefore they must meet certain requirements for physical, mechanical and operational parameters.*

***Keywords:** composite gypsum binder, 3D printing, gypsum cement-pozzolan binder, chalk additive, blast furnace slag, construction mix.*

Об авторах:

ЛЕСНИКОВ Илья Александрович – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: lesnik_2k@mail.ru

НОВИЧЕНКОВА Татьяна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: tanovi.69@mail.ru

ПЕТРОПАВЛОВСКАЯ Виктория Борисовна – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

СМИРНОВА Елена Вячеславовна – специалист 1-й категории по учебно-методической работе кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: elena020269@yandex.ru

About the authors:

LESNIKOV Ilya Alexandrovich – Master's Student of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: lesnik_2k@mail.ru

NOVICHENKOVA Tatiana Borisovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Production, Tver State Technical University, Tver. E-mail: tanovi.69@mail.ru

PETROPAVLOVSKAYA Victoria Borisovna – Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

SMIRNOVA Elena Vyacheslavovna – 1st Category Specialist in Educational and Methodological Work of the Department of Building Products and Structures Production, Tver State Technical University, Tver. E-mail: elena020269@yandex.ru

УДК 691.32

БЕТОНЫ С ЗАПОЛНИТЕЛЯМИ ИЗ СТЕКОЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Т.Р. Мамедов, Ю.Ю. Курятников, В.Б. Петропавловская,
Е.В. Смирнова

© Мамедов Т.Р., Курятников Ю.Ю.,
Петропавловская В.Б., Смирнова Е.В., 2024

Аннотация. В статье рассмотрена проблема вовлечения отходов промышленности для производства материалов строительного назначения. Исследование показало, что технология производства строительных материалов на основе стеклобоя достаточно проста, не требует специального оборудования и больших материальных вложений. После предварительной очистки и разделения на фракции сырье (стеклобой) может быть использовано для производства широкого спектра композитных материалов.

Ключевые слова: стеклобой, вяжущее, бетон, техногенные отходы, отходы стекла, строительные материалы.

Введение

Переработка, захоронение, обезвреживание и сбор промышленных отходов является одной из актуальных проблем окружающей среды. С экономической точки зрения вторичная переработка отходов невыгодна для хозяйствующих субъектов. Однако при использовании отходов можно решить экологические проблемы за счет экономии значительного количества топлива и энергии и сохранения природных ресурсов [2].

Наиболее ценными вторичными ресурсом является стеклянный бой. Переработка его экономически выгодна и не требует больших энергетических затрат.

Задачи реализации вторичной переработки стеклобоя:

эстетическая – возможное внедрение отдельного сбора отходов, позволяющее использовать контейнеры и мусоровозы, которые вписываются в эстетику города;