

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный технический университет»
(ТвГТУ)

**ИННОВАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ
В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ**

*Материалы IV Международной
научно-технической конференции
(19–20 февраля 2019 г.)*

Тверь 2019

УДК 338.45:69:620.1(082)

ББК 6531:38:30.3я43

Рецензенты: д. т. н., профессор, декан ФИТ Тверского государственного технического университета Хабаров А.Р.; к. т. н. доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов Национального исследовательского Московского государственного строительного университета Гальцева Н.А.

Инновации и моделирование в строительном материаловедении: материалы IV Международной научно-технической конференции (19–20 февраля 2019 г.) / под ред. В.В. Белова, А.А. Артемьев, В.Б. Петропавловской. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2019. 148 с.

Включены научные труды, посвященные возможностям математического моделирования, прогнозирования свойств и проведения автоматизированных расчетов, которые определяют сегодняшние инновационные подходы и методологию развития строительных технологий и процессов подготовки специалистов, работающих в данной сфере.

Предназначены для научных и инженерно-технических работников, научно-исследовательских, проектных и производственных организаций, а также докторантов, аспирантов, магистрантов и студентов вузов строительного профиля.

Подготовлены кафедрой производства строительных изделий и конструкций Тверского государственного технического университета.

Авторы предоставленных к опубликованию докладов несут ответственность за достоверность приведенных в них сведений.

ISBN 978-5-7995-1045-9

© Тверской государственный
технический университет, 2019

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ В КОНТЕКСТЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

И.И. Акулова, Г.С. Славчева

ВВЕДЕНИЕ

Технологии 3D-печати, относительно недавно появившиеся на отечественном рынке технологий, но уже положительно зарекомендовавшие себя в медицине и образовании, производстве одежды, обуви и даже ювелирных изделий, вызывают сегодня растущий интерес у профессионалов-строителей, строительной науки в целом и представителей бизнеса в отношении перспектив их применения в строительной практике. Сформировалось мнение, что эти технологии в ближайшее время коренным образом смогут изменить традиционные представления о строительном производстве. Предполагается, что 3D-аддитивные строительные технологии окажутся достаточно эффективными в жилищном и специальном (при возведении гаражей, ангаров, павильонов, тоннелей, резервуаров, бассейнов и пр.) строительстве, при создании элементов и объектов функционально-декоративного назначения. В связи с этим актуальной становится проблема изучения и анализа перспектив технологии 3D-печати как с позиций технической адаптации к специфике строительной отрасли, так и в контексте экономической эффективности их применения в интенсивно развивающейся сфере жилищного строительства [1, 2].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В рамках комплексного подхода для определения проблем применения и преимуществ 3D-аддитивных строительных технологий целесообразно, по нашему мнению, опираться на известный метод SWOT-анализа, позволяющий выявлять сильные и слабые стороны объекта изучения, возможности и аспекты, представляющие угрозу для его широкого использования на практике [3–7].

В качестве сильных сторон, или преимуществ, применения технологии 3D-печати в строительстве выделены (рисунок):

- 1) неограниченные архитектурные возможности;
- 2) сокращение сроков возведения здания;
- 3) относительно низкие трудо- и ресурсоемкость;
- 4) высокая экологичность и качество процесса возведения;
- 5) повышенная безопасность труда.

В подтверждение «скоростных» возможностей рассматриваемой технологии отметим, что, по данным компании WinSun, реально получить дом площадью 200 м² в течение суток. Однако на практике существующие скорости печати аддитивных слоев в совокупности с иными

сопутствующими технологическими процессами не обеспечивают рекламируемых сроков возведения объектов заданной конфигурации.

Сильные стороны	Слабые стороны
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Высокая скорость возведения здания; ✓ низкие трудозатраты; ✓ экономичность; ✓ неограниченные архитектурные возможности; ✓ экологичность; ✓ высокая безопасность труда 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Сложность подбора составов; ✓ высокая стоимость растворных смесей ✓ отсутствие квалифицированного персонала; ✓ ограниченная зона печати; ✓ специальные условия для обеспечения нормальной работы принтера; ✓ отсутствие нормативной базы для аддитивного производства; ✓ возможность обеспечения неполного цикла строительного-монтажных работ
Возможности	Угрозы
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Применение для создания малых архитектурных форм; ✓ возможность занять нишу малоэтажного домостроения; ✓ техническое и технологическое совершенствование 3D-печати 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Нецелесообразность применения в многоэтажном массовом жилищном строительстве

SWOT-анализ 3D-аддитивных строительных технологий

Обращает на себя внимание незначительное количество отходов при использовании 3D-аддитивных строительных технологий, что в целом снижает негативную нагрузку на окружающую среду. Кроме того, и в составе раствора для печати возможно утилизировать отходы, возникающие в процессе строительного производства.

Несмотря на, казалось бы, очевидные преимущества, технология 3D-печати имеет свои слабые стороны и ограничения [4–7]:

- 1) сложность подбора составов строительных смесей и их дороговизна;
- 2) отсутствие широкого ассортимента составов экструзионных смесей;
- 3) отсутствие квалифицированного персонала;
- 4) ограниченная зона печати (конструкция принтеров в виде мостового крана);
- 5) жесткие ограничения по скорости укладки слоев и по срокам схватывания «печатной» строительной смеси;
- 6) отсутствие нормативной базы для аддитивного производства (например, по контролю качества и свойств);
- 7) обеспечение неполного цикла строительного-монтажных работ (возможность устройства горизонтальных несущих конструкций реализуется только с применением сборных элементов);
- 8) высокая стоимость современных 3D-принтеров.

Дополнительно нужно указать, что при производстве работ на основе 3D-аддитивных строительных технологий необходимо обеспечить непрерывность процесса «печати» здания, а при отсутствии возможности ведения работ без перерывов – сократить их продолжительность до минимума. С учетом результатов SWOT-анализа и имеющихся технических возможностей современных 3D-принтеров в качестве одного из самых перспективных направлений использования 3D-аддитивных строительных технологий следует выделить малоэтажное (до трех этажей) жилищное строительство.

Для подтверждения или опровержения данного вывода по критерию минимума прямых затрат на 1 м² общей площади осуществлялась оценка эффективности 3D-печати на примере двухэтажного жилого дома массовой застройки. Проект дома соответствовал климатическим условиям Воронежской области, отвечал требованиям компактности и энергоэффективности, а также габаритным размерам и техническим возможностям 3D-принтера WinSun.

В базу сравнения были включены варианты, различающиеся материалами и технологиями возведения основных конструктивных элементов:

1) сборная строительная технология с применением силикатного кирпича;

2) сборная строительная технология с использованием газосиликатных мелких блоков D600;

3) сборно-монолитная строительная технология на основе 3D-печати, реализуемая:

а) с использованием оригинальных смесей, разработанных сотрудниками Воронежского государственного технического университета;

б) «печатных» смесей, предлагаемых на строительном рынке;

4) монолитная строительная технология на основе системы «Монопор» [8].

Для обозначенных вариантов строительства индивидуального жилого дома рассчитывались прямые затраты на единицу общей площади здания по отличающимся материалам и технологией исполнения конструкций, а также трудоемкость их возведения. Отметим, что в структуру прямых затрат входили затраты на материалы, эксплуатацию машин и механизмов, оплату труда рабочих.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных расчетов получено, что по критерию минимума прямых затрат и затрат живого труда 3D-аддитивные строительные технологии, в сравнении с другими рассмотренными вариантами возведения малоэтажного жилого объекта, являются наиболее эффективными (таблица).

Сравнительный анализ ресурсоэффективности различных конструктивных решений двухэтажного жилого здания

Вид затрат	Значение показателя по вариантам				
	1. С использованием силикатного кирпича	2. С использованием газо-силикатных мелких блоков	3. На основе 3D-строительной технологии:		4. На основе системы «Монопор»
			оригинальные смеси ВГТУ для 3D-принтера	смеси для 3D-принтера, предлагаемые на рынке	
Прямые затраты, руб./м ²	10 603.33	8 193.6	5 268.58	7 715.6	8 780.4
Затраты труда, чел.-ч/м ²	12.3	9.9	8.2	8.2	20.8

Вместе с тем в случае применения 3D-печати с использованием смесей, приобретаемых по относительно высоким рыночным ценам, эта технология является сопоставимой со сборной технологией с применением газосиликатных мелких блоков. Так, превышение прямых затрат на 1 м² общей площади коттеджа со стенами из газосиликата в ценах III квартала 2018 г. составляет всего 5 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На современном этапе развития технологий 3D-печати в контексте их экономической эффективности, вероятно, они не представляют интереса для крупных застройщиков, возводящих в основном многоэтажные жилые объекты, а для малых и средних строительных компаний приобретение принтера и рецептов составов «печатных» смесей при небольших объемах строительно-монтажной работы станет непреодолимым инвестиционным барьером.

Кроме того, для регионов, обладающих развитой базой по производству газосиликатных мелких блоков, актуальность вопроса применения 3D-аддитивных технологий в малоэтажном жилищном строительстве является по меньшей мере сомнительной, поскольку сборная технология малоэтажного строительства на основе газосиликата без каких-либо дополнительных финансовых затрат является достаточно эффективной и сопоставимой с 3D-строительными технологиями.

Таким образом, внедрение в практику жилищного строительства конкретного региона технологии 3D-печати должно осуществляться на основе комплексного подхода и глубокого анализа не только возможностей 3D-принтеров, величины затрат на строительство, но и региональной специфики.

Библиографический список

1. Грахов, В.П. Влияние развития 3D-технологий на экономику строительства / В.П. Грахов, С.А. Мохначев, О.В. Бороздов // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 11. Ч. 12. С. 273–276.
2. Bos, F. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing / F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed // *Virtual and Physical Prototyping*. 2016. V. 11. №. 3. P. 209–225.
3. Акулова, И.И. Прогнозирование развития регионального строительного комплекса: теория, методология и прикладные задачи: монография / И.И. Акулова, Е.М. Чернышов, В.А. Праслов. Воронеж: ВГТУ, 2016. 162 с.
4. Акулова, И.И. Строительные 3D-аддитивные технологии: проблемы и возможности / И.И. Акулова, Н.Г. Гетманова // *Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: материалы 5-й Международной научно-практической конференции Института архитектуры, строительства и транспорта*. Тамбов: ТГТУ, 2018. С. 209–213.
5. Hage, I. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? / I. Hage, A. Golonka, R. Putanowicz // *Procedia Engineering*. 2016. V. 151. P. 292–299.
6. Славчева, Г.С. 3D-аддитивные технологии: научные проблемы и противоречия их применения в строительстве / Г.С. Славчева // *Проблемы современных экономических, правовых и естественных наук в России: материалы VI Международной научно-практической конференции ВГТУ*. Ганновер – Воронеж: ВГТУ, 2017. С. 118–121.
7. Krimi, I. Prospective study on the integration of additive manufacturing to building industry – Case of a French construction company / I. Krimi, Z. Lafhaj, L. Ducoulombier // *Additive Manufacturing*. 2017. V. 16. P. 107–114.
8. Славчева, Г.С. Вопросы повышения эффективности применения неавтоклавных ячеистых бетонов (пенобетонов) в строительстве / Г.С. Славчева, К.С. Котова // *Жилищное строительство*. 2015. № 8. С. 44–47.

УДК 691.3

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

О.В. Александрова, Нгуен Дык Винь Куанг

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире бетон является одним из наиболее широко используемых строительных материалов, применение которого растет как по объему, так и по разнообразию. Но отмечается низкая прочность и короткий срок службы существующих конструкций из традиционных

бетонов, в связи с чем возникает необходимость проектирования высококачественных бетонов с повышенными физико-механическими свойствами [1–3]. Такие бетоны, как правило, используют для возведения высотных зданий, большепролетных мостов, предварительно напряженных железобетонных конструкций, тоннелей и других подземных сооружений, контейнеров для хранения опасных жидкостей или ядерных отходов и т. д.

Высококачественный бетон отличается более плотной структурой, низким водоцементным отношением, высокой прочностью в ранние сроки твердения, низкой гигроскопичностью и тепловыделением при твердении, а также долговечностью при эксплуатации в агрессивных средах [4–5].

Для достижения указанных свойств требуется тщательный выбор сырьевых компонентов и определение их оптимальной дозировки. Для получения высоких значений по прочности бетона и требуемой пластичности бетонной смеси может быть использован тонкомолотый кварцевый порошок.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения экспериментальных исследований были использованы определенные сырьевые материалы и методы испытаний:

1. Сульфатостойкий портландцемент PCSR40 (тип V) производства компании «Лукс Цемент Лимитед» (Вьетнам), свойства которого соответствуют стандартам TCVN 7711-2013 (Вьетнам) и ГОСТ 22266-2013. Свойства использованного цемента: содержание C_3A – 2.49 %; содержание $C_4AF + 2C_3A$ – 21.23 %; истинная плотность – 3.15 г/см³; сроки схватывания: начало – 170 мин., окончание – 213 мин.; прочность на сжатие в возрасте 28 сут – 46.5 МПа.

2. Микрокремнезем производства фирмы Sika limited (Вьетнам), с размером частиц <0.1 мкм и истинной плотностью порядка 2.15 г/см³, соответствующий требованиям TCVN 8827-2011 и ГОСТ Р 56592-2015.

3. Зола-унос класса F тепловой электростанции Pha Lai (Вьетнам) с частицами сферической формы, демонстрирующая пуццолановые свойства благодаря высокому содержанию аморфного кремнезема (57.43 %). Использованная зола отвечала требованиям TCVN 10302-2014 и ГОСТ 25818-2017.

4. Гранитный щебень из карьера Га Лой, расположенного в центральном регионе Вьетнама, с размером частиц 20 и 10 мм в соотношении 3:2, истинной плотности 2.68 г/см³, водопотребностью 0.5 % и средней прочностью при сдавливании в цилиндре 105.6 МПа.

5. Кварцевый песок реки Хуонг, протекающей в центральном регионе Вьетнама, с истинной плотностью 2.6...2.65 г/см³, водопотребностью 6 %. Использованные песок и щебень соответствовали стандартам TCVN 7570-2006, ГОСТ 8736-2014 и ГОСТ 8267.0-97.

6. Кварцевый порошок в виде кварцевой муки взамен части мелкого заполнителя, с дисперсностью от 5 до 10 мкм, полученной измельчением белого кварцевого песка из центрального региона Вьетнама.

Суперпластификатор Sika® ViscoCrete®-151 (Швейцария) в виде водного раствора плотностью 1.075...1.095 кг/л и pH 4.0...6.0. Использованный суперпластификатор соответствовал требованиям TCVN 8826-2011 (тип G) и ГОСТ Р 56592-2015.

Для приготовления бетонной смеси использовалась питьевая вода, отвечающая требованиям TCVN 4506-2012 и ГОСТ 23732-2011.

Целью исследования было получение бетона с минеральными добавками, обладающего прочностью на сжатие 80 МПа.

Было изготовлено 8 составов бетонных смесей с водовяжущим отношением 0.3 (таблица), содержащих микрокремнезем, золу-унос, суперпластификатор (1.8 % от массы цемента) и кварцевую муку (20 % масс.) взамен части мелкого заполнителя. Содержание микрокремнезема, золы-уноса и кварцевой муки в этих составах варьировалось следующим образом: микрокремнезем – 0 % (контрольный образец); 5; 7.5; 10 и 12.5 % масс.; зола-унос – 0 % (контрольный образец), 20 и 30 % масс., кварцевая мука – 0 и 2 % масс.

Прочностные свойства высококачественных бетонов

№ состава	Вяжущее вещество, кг/м ³	Водовяжущее отношение, В/В _{вяж}	Кварцевый порошок, % масс.	Микрокремнезем, % масс.	Зола-унос, % масс.	Средняя прочность на сжатие, МПа, в возрасте, сут				Прочность на растяжение, МПа, в возрасте 28 сут	Прочность на растяжение при изгибе, МПа, в возрасте 28 сут
						3	7	28	56		
1	550	0,3	–	–	–	67.6	71.1	82.6	91.3	5.7	7.9
2			20	–	–	72.6	82.6	89.3	100.3	6.0	8.2
3			–	5	20	41.3	62.2	65.3	78.8	6.0	8,2
4			20	5	20	52.4	76.0	81.8	97.9	5.7	8.8
5			20	5	30	67.3	72.9	80.2	95.7	5.6	8.3
6			20	7,5	30	63.9	67.5	81.6	97.9	5.7	8.9
7			20	10	30	69.3	75.0	90.8	109.7	6.1	9.3
8			20	12.5	30	72.1	76.5	84.2	101.7	5.8	8.9

Приготовление образцов

Смесь сухих материалов перемешивалась в лабораторном смесителе в течение 2 мин., затем добавлялась вода, содержащая 1.8 % суперпластификатора от массы цемента, и вся смесь снова перемешивалась еще 3 мин.

Для испытания прочности на сжатие приготавливались образцы в виде стандартных кубов размером 150 × 150 × 150 мм. Для определения

прочности на осевое растяжение – цилиндрические образцы диаметром 150 мм и высотой 300 мм, а также образцы-призмы размером 100 × 100 × 400 мм для определения прочности на растяжение при изгибе.

После изготовления все образцы оставлялись на 24 ч в формах, затем извлекались из форм и погружались в воду для дальнейшего твердения на 3, 7, 28 и 56 сут. Выдержанные таким образом образцы сушились на воздухе и затем испытывались на прочность на сжатие, осевое растяжение и растяжение при изгибе на универсальной испытательной машине Matest C089-17N.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наблюдается тенденция повышения прочностных показателей исследованных бетонов с ростом содержания тонкодисперсных минеральных наполнителей и увеличением возраста их твердения (см. таблицу). При этом оптимальным является следующее содержание минеральных добавок в бетонной смеси: 20 % масс. кварцевого порошка (вместо части песка) и 40 % тонкодисперсных минеральных наполнителей (10 % масс. микрокремнезема и 30 % масс. золы-уноса) взамен цемента в составе вяжущего.

Испытание на прочность на сжатие

Все образцы показали увеличение прочности на сжатие при замене части цемента микрокремнеземом до 10 % масс., а затем ее снижение при увеличении количества микрокремнезема до 12.5 % масс. Максимальная прочность бетона на сжатие, равная 109.7 МПа, была получена при замене 20 % масс. песка кварцевой мукой и введении в состав вяжущего 10 % масс. микрокремнезема и 30 % масс. золы-уноса вместо части цемента.

Определение прочности на осевое растяжение

Из результатов, приведенных в таблице, видно, что прочность бетонных образцов на осевое растяжение постепенно увеличивается с ростом содержания минеральных добавок и кварцевого порошка. Максимальное значение прочности в возрасте 28 сут составляет 6,06 МПа и достигается при замене в составе вяжущего 40 % масс. цемента 30 % масс. золы-уноса и 10 % масс. микрокремнезема, а также при использовании 20 % масс. кварцевого порошка вместо части песка. Результаты испытаний показали, что прочность осевого растяжения у образцов, содержащих исследованные тонкодисперсные добавки, на 7 % больше прочности контрольных образцов из состава № 1, не содержащего минеральных добавок.

Определение прочности на растяжение при изгибе

Из результатов таблицы видно, что у всех исследованных образцов, содержащих минеральные добавки, прочность на изгиб в возрасте 28 сут выше по сравнению с контрольным составом № 1. При этом наибольшее значение прочности, равное 9.3 МПа, показал состав № 7, в

котором мелкий заполнитель на 20 % масс. заменен кварцевой мукой, а в вяжущем вместо соответствующего количества цемента содержатся 10 % масс. микрокремнезема и 30 % масс. золы-уноса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных исследований показывают, что для получения бетона с минеральными добавками, обладающего высокими прочностными показателями, оптимальной является замена части цемента (до 40 % масс.) минеральной добавкой, состоящей из 30 % масс. золы-уноса и 10 % масс. микрокремнезема, а также частичная замена мелкого заполнителя кварцевой мукой (20 % масс.) с размером частиц 5–10 мкм (см. таблицу).

Все испытанные образцы показали увеличение прочности при замене цемента микрокремнеземом до 10 % масс. с последующим ее снижением при повышении расхода микрокремнезема до 12,5 % масс. при содержании золы-уноса в составе вяжущего 30 % масс.

Результаты прочностных испытаний исследованных бетонов, содержащих тонкодисперсные минеральные добавки, показали их высокие характеристики. Это можно объяснить физическим и химическим воздействием исследованных добавок, приводящим к улучшению микроструктуры бетонов, за счет формирования плотно упакованного геля С-S-H в тонкой и прерывистой структуре пор цементного камня, благодаря высоким пуццолановым свойствам микрокремнезема и золы-уноса ТЭС Pha Lai.

Кроме того, опираясь на результаты проведенного экспериментального исследования, можно вывести несколько математических уравнений зависимости прочности бетона от содержания использованных тонкодисперсных минеральных добавок.

Высококачественный бетон с минеральными добавками может быть эффективно использован при строительстве высотных зданий, мостов, автомобильных дорог, а также метрополитена и различных подземных сооружений с обеспечением их высокой долговечности и длительных сроков безремонтной эксплуатации. Использование такого бетона позволит снизить стоимость строительства и сократить его сроки.

Библиографический список

1. Shi, Hui-sheng. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete / Hui-sheng Shi, Bi-wan Xu, Xiao-chen Zhou // Construction and building materials. 2009. № 23 (5). P. 1980–1985. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.021.

2. Long, G. Very-high-performance concrete with ultrafine powders / G. Long, X. Wang, Y. Xie // Cement and Concrete Research. 2002. № 32 (4). P. 601–605. DOI: 10.1016/s0008-8846(01)00732-3.

3. Shannag, M.J. Characteristics of lightweight concrete containing mineral admixtures / M.J. Shannag // Construction and Building Materials. 2011. № 25 (2). P. 658-662. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.025.

4. Temiz, H. An investigation on microstructure of cement paste containing fly ash and silica fume / H. Temiz, A. Karakeci // Cement and Concrete Research. 2002. № 32 (7). P. 1131–1132. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00749-4.

5. Malathy, R. Role of admixtures in reducing permeability and corrosion of high performance concrete / R. Malathy, K. Subramanian // Civil Engineering & Construction Review. 2006.

УДК 666.97

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИФИКАТОРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

Али Рушди Ахмед, В.В. Белов, Д.Г. Абрамов

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире усиливается тенденция сбережения тепловой энергии. Введение в действие новых требований по повышению теплозащитных свойств ограждающих конструкций зданий и сооружений различного функционального назначения предполагает постоянное расширение номенклатуры теплоизоляционных материалов высокого качества и разработку новых технологий производства высокоэффективных газобетонов. Однако большинство существующих технологий требуют применения дорогостоящего сырья (портландцемента, извести, молотого кварцевого песка и др.), что негативно отражается на стоимости и конкурентоспособности материала [2, 3].

Основная проблема при изготовлении неавтоклавного газобетона – его низкие прочность и трещиностойкость. Добиться повышения физико-механических свойств строительных материалов можно за счет введения химических добавок. Одним из эффективных способов увеличения подвижности бетонной смеси, повышения прочности и долговечности бетона является введение добавок, а именно гиперпластификаторов. Исследовано влияние таких добавок на сроки схватывания и показатели нормальной густоты цементного теста, на тепловыделение, контракцию цементного теста [1]. Совместное использование суперпластификаторов и эффективных конвертеров-наполнителей из натурального сырья с реактивной химической активностью положительно сказывается на прочностных характеристиках и формировании бездефектной газобетонной конструкции [4, 5]. Применяют супер- или гиперпластификаторы, позволяющие снизить В/Ц, и вводят микронаполнители, обладающие высокой водопотребностью [6].

Высокие показатели эффективности показывают суперпластификаторы на основе полиэтиленгликоля [7].

Российскими учеными осуществляется разработка пластификаторов на углеводной основе. Испытание полученных добавок показало хорошие результаты по сравнению с имеющимися на рынке аналогами, хотя изучение этих добавок еще продолжается [8]. Подтверждена возможность повышения прочностных характеристик бетона за счет правильного выбора вида суперпластификатора. Установлено, что время растекания бетонной смеси при повышении дозировок суперпластификатора увеличивается и составы с добавкой Melflux обладают минимальным воздухововлечением. При использовании данного гиперпластификатора были достигнуты максимальные значения прочности [9].

Изучению влияния карбонатных наполнителей на свойства цементных композитов посвящены работы различных авторов. Установлено, что данный наполнитель способствует уплотнению микроструктуры, повышению прочности матрицы бетона, а также положительно влияет на процессы твердения вяжущей композиции [10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данной работе в качестве основных компонентов для изготовления газобетона неавтоклавного твердения применяли портландцемент марки ПЦ500-Д0, пылевидные базальтовые отходы, молотый кварцевый песок, алюминиевую пудру марки ПАП-2, суперпластификатор СП-1, гиперпластификаторы Melflux.

Исследовалось влияние на водоредуцирующий эффект сырьевой смеси пластифицирующей добавки, в качестве которой использовались суперпластификатор СП-1, гиперпластификаторы Melflux 1641 и Melflux 5581. Водоредуцирующий эффект V_p для получения установленного расплыва смеси без добавки и с добавкой пластификатора рассчитывали по формуле

$$V_p = \frac{V/T_n - V/T_p}{V/T_n} * 100,$$

где V/T_n и V/T_p – водотвердое отношение смеси без добавки и с добавкой пластификатора соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты сравнительных испытаний пластификаторов представлены в табл. 1 и на рис. 1.

При введении гиперпластификатора Melflux 5581 достигается наибольший водоредуцирующий эффект. При использовании гиперпластификатора Melflux 1641 водоредуцирующий эффект несколько меньше. Водоредуцирующий эффект суперпластификатора СП-1 был значительно ниже.

Таблица 1. Зависимость водоредуцирующего эффекта от содержания пластификаторов

Количество добавки, % от Ц	Водоредуцирующий эффект при содержании пластификаторов, %		
	СП-1	Melflux 1641	Melflux 5581
0.20	27.5	41.9	44.6
0.40	36.5	46.8	52.5
0.60	40.0	50.2	57.7

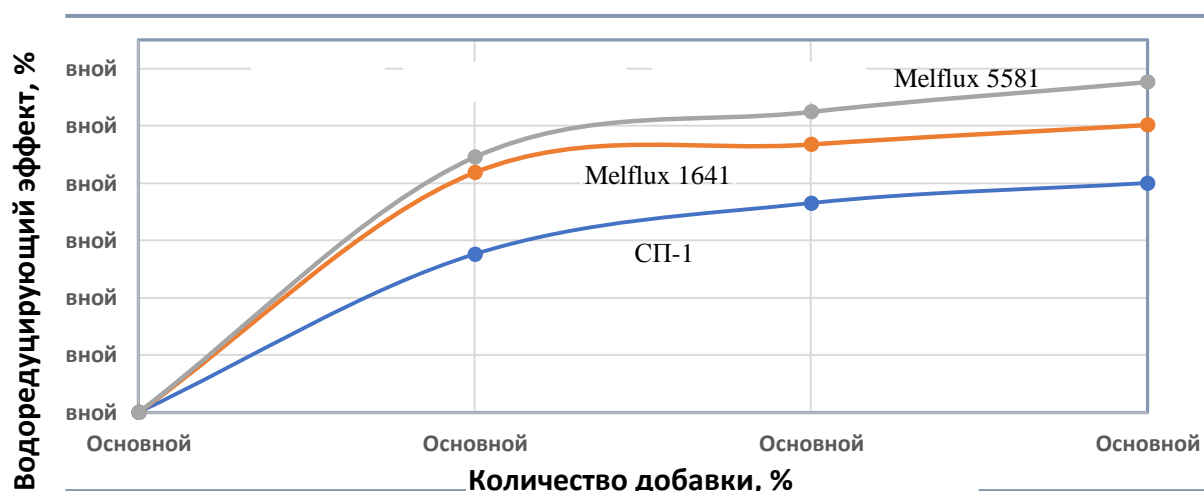


Рис. 1. Зависимость водоредуцирующего эффекта от содержания пластификаторов

Далее изготавливали образцы газобетона марок со средней плотностью D500 кг/м³ (составы 1–3) и D600 кг/м³ (составы 4–6) на основе цемента и пылевидных базальтовых отходов.

Предел прочности на сжатие и фактическая средняя плотность полученного неавтоклавного газобетона представлены в табл. 2. Образцы хранились 7 сут в нормальных условиях, то есть при температуре (20±2) °С и относительной влажности (95±5) %.

Таблица 2. Физико-механические свойства неавтоклавного газобетона на основе пылевидных базальтовых отходов с использованием пластификаторов

№ состава	Вариант состава, %	Расход цемента на 1 м ³ бетона, кг	Расход воды на 1 м ³ бетона, л	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
D500					
1	СП-1 – 0.8	240	310	515	1.20
2	Melflux 1641 – 0.3	240	280	520	1.36
3	Melflux 5581 – 0.3	240	270	535	1.60
D600					
4	СП-1 – 0.6	260	300	550	1.61
5	Melflux 1641 – 0.3	260	280	555	1.66
6	Melflux 5581 – 0.3	260	260	565	1.87

Из данных табл. 2 следует, что максимальная прочность для газобетона марок D500 и D600 достигается составами № 3 (1.6 МПа) и № 6 (1.87 МПа) соответственно, то есть при применении в количестве 0.3 % гиперпластификатора Melflux 5581. Использование гиперпластификатора Melflux 5581 вместо суперпластификатора при оптимальных концентрациях при одинаковом расходе цемента дает выигрыш в прочности 24–33 % по сравнению с составами № 1 и № 4 для газобетона обеих марок по средней плотности. При применении Melflux 1641 в количестве 0.3 % для газобетона марок D500 и D600 прочность выше на 10–13 % по сравнению с составами с суперпластификатором при оптимальной концентрации 0.8 %.

В табл. 3 приведены результаты исследований физико-механических свойств неавтоклавного газобетона на основе молотого кварцевого песка с использованием суперпластификатора СП-1 и гиперпластификаторов Melflux 1641, Melflux 5581. Анализ полученных данных показывает, что применение гиперпластификатора вместо суперпластификатора при том же расходе цемента дает выигрыш в прочности около 20 %. Максимальная прочность (1.50 МПа) для газобетона на основе молотого кварцевого песка достигается составом № 3 с применением 0.3 % Melflux 5581 (прочность увеличивается на 15 % по сравнению с контрольным составом № 2, в котором применялся Melflux 1641 в количестве 0.3 % от массы цемента).

Таблица 3. Физико-механические свойства неавтоклавного газобетона с использованием пластификаторов на основе молотого кварцевого песка

№ состава	Вариант состава, %	Ц, кг	Молотый кварцевый песок, кг	Al пудра, г	NaOH, кг	Вода, л	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа
1	Контрольный: СП-1 – 0.8	260	260	650	2.60	200	540	1.18
2	Melflux 1641 – 0.3					200	555	1.35
3	Melflux 5581 – 0.3		250			200	558	1.50

На рис. 2 показана микроструктура образца неавтоклавного газобетона оптимального состава D600 на основе пылевидных базальтовых отходов. При изготовлении газобетона целесообразно использовать суперпластификатор СП-1, так как гиперпластификаторы не дают значительного прироста прочности газобетону, а их стоимость существенно выше.

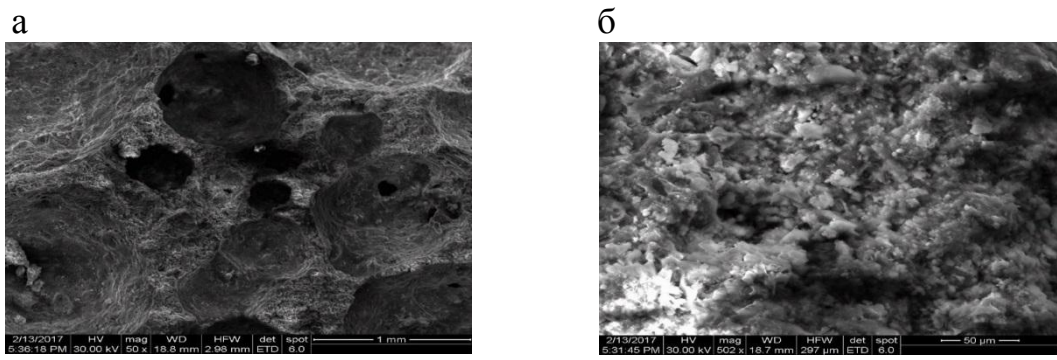


Рис. 2. Микроструктура образца неавтоклавного газобетона оптимального состава D600 на основе пылевидных базальтовых отходов: а – х50; б – х500

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что прочность газобетона неавтоклавного твердения на основе пылевидных базальтовых отходов снижает расход цемента на 40 кг/м³ без потери прочности по сравнению с образцами на основе молотого кварцевого песка.

При применении пылевидных базальтовых отходов вместо молотого кварцевого песка создаются реальные возможности для экономии энергетических ресурсов и капитальных вложений, которые требуются при измельчении.

Повышение прочности за счет применения гиперпластификаторов и проведения других затратных технологических мероприятий экономически не оправдывает указанного уменьшения расхода цемента.

Таким образом, при выборе пластифицирующей добавки для изготовления газобетона неавтоклавного твердения необходимо учитывать полученные данные. Так, в ряде случаев может оказаться целесообразным использование суперпластификатора СП-1, так как определенные гиперпластификаторы не дают значительного прироста прочности газобетона, а стоимость их в несколько раз выше.

Библиографический список

1. Богданов, Р.Р. Влияние гиперпластификаторов на основе эфира поликарбоксилата и полиарила на свойства цементных композиций / Р.Р. Богданов, А.А. Калимуллин // Вестник Казанского национального исследовательского технологического университета. 2017. № 20. С. 70–73.
2. Белов, В.В. Модифицирование сухих поробетонных смесей на основе техногенных вторичных ресурсов / В.В. Белов, Ю.Ю. Курятников // Строительные материалы. 2008. № 2. С. 6–7.
3. Леонтьев, Е.Н. К вопросу о неавтоклавном газобетоне / Е.Н. Леонтьев, О.А. Коковин // Технологии бетонов. 2007. № 5. С. 50.

4. Езерский, В.А. Улучшение свойств мелкозернистого бетона с помощью комплексных минеральных добавок / В.А. Езерский // Строительные материалы. 2015. № 6. С. 4–6.

5. Курятников, Ю.Ю. Неавтоклавный газобетон с применением гиперпластификаторов / Ю.Ю. Курятников, Р.В. Коновалов // Инновации и моделирование в строительном материаловедении и образовании: материалы международной заочной научно-технической конференции. Тверь: ТвГТУ, 2014. С. 59–61.

6. Баженов, Ю.М. Технология бетона / Ю.М. Баженов. М.: АСВ, 2010. 528 с.

7. Тарасов, В.Н. Отечественные поликарбоксилатные суперпластификаторы производства ООО «НПП «Макромер» для бетона, гипса и строительных смесей / В.Н. Тарасов // Технологии бетонов. 2015. № 1–2. С. 16–18.

8. Несветаило, В.М. Отечественный гиперпластификатор для бетона / В.М. Несветаило // Технологии бетонов. 2014. № 9. С. 9–11.

9. Морозов, Н.М. Роль суперпластифицирующих добавок в формировании прочности самоуплотняющегося бетона / Н.М. Морозов, А.Ф. Галеев // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. № 4 (38). С. 376–381.

10. Курятников, Ю.Ю. Влияние карбонатных наполнителей на физико-механические свойства газобетона неавтоклавного твердения / Ю.Ю. Курятников // Вестник Тверского государственного технического университета. 2011. Вып. 14. С. 44–49.

УДК 517.9

АКТУАЛЬНОСТЬ И ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

А.А. Артемьев

ВВЕДЕНИЕ

Стратегическая значительность дальнейшего формирования инновационного сектора национальной экономики объясняется тем, что он является решающим фактором повышения конкурентоспособности страны на мировых рынках, а также роста эффективности и ускорения развития различных секторов национальной экономики, сконцентрированной на удовлетворении внутренних потребностей с наименьшими издержками. Это можно объяснить тем, что главным признаком инновационной деятельности являются качественные изменения всех видов и форм хозяйственной деятельности, которые обусловлены динамикой внешних

изменений и внутренних возможностей повышения эффективности в достижении стратегических целей. Необходимо отметить, что инновационная деятельность ориентирована не на количественные, а на качественные параметры продуктов (услуг) и технологических процессов, повышения эффективности организации и управления различными производственными процессами.

Моделирование в строительном материаловедении, несомненно, является прогрессивным видом деятельности, так как в результате его осуществления появляются новые или существенно измененные строительные материалы, изделия или конструкции, то есть инновационная продукция. Возникновение подобных материалов подчинено таким факторам, как необходимость повышения скорости возведения здания и сооружений, их прочности, тепло- и звукоизоляционных свойств, экологичности, эффективности производства, разумной себестоимости и т. д.

Новизна исследования заключается в том, что в статье исследованы и обобщены преимущества использования современного математического моделирования в строительном материаловедении, а также выявлены и обоснованы этапы оптимизации полученной модели.

Цель исследования – определить области применения математического моделирования в строительном материаловедении. Основные задачи исследования – выявить и охарактеризовать наиболее распространенные виды моделей и эффективность их использования в строительном материаловедении.

МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время все большее распространение получает математическое моделирование. Оно заключается в замене исследуемого объекта его логико-математическим представлением, которое допускает точный или приближенный численный или аналитический анализ, с дальнейшими интерпретацией полученных результатов и построением имитационных моделей. На современном этапе развития строительного материаловедения понятие «математическое моделирование» может использоваться в совершенно разных контекстах и означать:

экспериментально-статистическое моделирование, то есть построение и статистическое исследование аналитических зависимостей на основе эмпирических данных, включая последующую визуализацию;

получение новых или уточнение существующих аналитических взаимосвязей между параметрами структуры и (или) показателями макроскопических свойств материалов, выполняемых на основе известных феноменологических или фундаментальных моделей нижележащих структурных уровней;

получение новых или уточнение существующих геометрических моделей структуры строительных материалов (как правило, на уровне макроструктуры) с целью оптимизации гранулометрического состава дисперсных фаз и (или) оценки взаимосвязей гранулометрического состава, напряженно-деформированного состояния, барьерных свойств и физико-механических показателей [1, 4].

При проектировании строительных материалов и изделий, а также необходимых технологических процессов часто необходимо изучить закономерности, действующие в процессе изготовления, в целях использования этих закономерностей для обеспечения требуемого качества, заданного количества при наименьшей себестоимости. Проектирование технологических процессов производства строительных материалов является важнейшей задачей технологической подготовки производства строительных материалов, решить которую позволяет применение моделей и моделирования. В тех случаях, когда при проектировании нового или модернизации существующего строительного материала или процесса эксперименты с ними экономически не целесообразны, опасны или невозможны, знания о таких процессах получают с помощью моделирования. При достаточной сложности и высокой надежности изделия требуется большое количество моделей на этапе его проектирования. Исходный расчет, который основан на адекватных математических моделях, может позволить воздержаться от неточностей при проектировании или совершенствовании строительных материалов, тем самым значительно уменьшить затраты ресурсов и времени на создание и экспериментальную отработку образцов проектируемой продукции. Математическое моделирование дает возможность получать сравнительные характеристики для строительных материалов, которые различаются по структуре, что практически невозможно при физическом эксперименте. Целесообразно применять математическое моделирование при выборе рациональных составов разрабатываемых строительных материалов, формировании эталонных технологических параметров, поиске путей модернизации.

Современный математический аппарат имеет универсальные средства исследования, которые позволяют успешно создавать математические модели. Во время построения математической модели определенного объекта или процесса, выделяют особенности, которые дают наиболее полную информацию об объекте исследования и допускают его математическое описание, то есть ставят в соответствие особенностям объекта подходящие математические понятия, что дает возможность математически описать связи и отношения, которые обнаружены или предполагаются между отдельными элементами и составными частями изучаемого объекта или процесса, а значит, получить математическую модель [2, 3].

В настоящее время при изучении объектов и процессов широко применяются, наряду с математическими моделями, методы имитационного моделирования.

На сегодняшний день существует большое количество программного обеспечения для создания имитационных моделей, их расчета и анализа.

При научных исследованиях проектируемых производственных процессов и строительных материалов в строительном материаловедении часто необходимо оптимизировать полученную модель. Рассмотрим этапы оптимизации.

Выбор критерия оптимальности. От данного выбора зависит направление дальнейшей оптимизации полученной модели. Критерий оптимальности – это то, относительно чего будет рассматриваться оптимизация модели и оцениваться полученные результаты.

Выбор входных факторов. Критерий оптимальности, как правило, зависит от некоторых факторов. Входной фактор характеризует воздействие на исследуемую модель.

Назначение ограничений величины входных факторов. Это необходимо для того, чтобы полученные результаты наиболее достоверно отражали действительность при практическом применении.

Составление математической модели задачи оптимизации. Математическая модель составляется в соответствии с принятыми ограничениями величины входных факторов.

Выбор метода решения задачи оптимизации. Существует большое количество методов решения задач оптимизации. Они могут быть общепринятыми (например, нелинейное программирование, теория массового обслуживания) или специальными (например, метод потенциалов, симплексный метод и др.). Выбор метода решения зависит от составленной модели задачи и определяется исследователем на основании опыта или исследования. При определении целесообразности различных методов на первый план выходят понятия, которые обозначаются терминами «эффективность» и «оптимальность». Для зарубежных научных исследований характерно разграничение двух понятий, которые в отечественной литературе обозначаются термином «эффективность»:

количественная (как правило) характеристика, определяемая соотношением текущих и минимально необходимых затрат ресурсов для достижения заданной цели; соответствует минимизации посторонних затрат ресурсов;

качественная характеристика метода, связанная с принципиальной возможностью достижения цели вне контекста сравнительного анализа затрат ресурсов.

Решение задачи оптимизации проходит, как правило, с применением соответствующих программных средств.

Подведение итогов и выводов по решению задачи. После решения задачи и получения оптимальных характеристик модели необходимо сделать выводы, которые позволят проанализировать и оценить решение. Часто полученные результаты необходимо обработать статистически, проверить на адекватность, достоверность и практическую применимость.

Моделирование должно быть основано на рассмотрении физически подобных явлений. Теория подобия играет важную роль при моделировании. Если два физических объекта подобны, то по характеристикам одного объекта можно получить все характеристики другого простым пересчетом при помощи переходных коэффициентов. Для сохранения подобия при моделировании необходимо соблюдать критерии подобия. Во всех случаях, когда технически невозможно выполнить равенство по какому-либо критерию подобия, возникает опасность появления так называемого масштабного эффекта, то есть несоответствия в характеристиках модели и натурального объекта. Таким образом, большинство исследований, проведенных с помощью моделей, необходимо дополнять исследованиями на масштабный эффект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В производственных процессах математическое и имитационное моделирование играет большую роль. Оно позволяет поднять уровень и конкурентоспособность производства, сократить сроки выпуска новой продукции, проанализировать и оптимизировать ее, улучшить производственные процессы. Развитию моделирования вместе с тем способствует совершенствование аппаратных и программных средств в информационных технологиях.

Библиографический список

1. Белов, В.В. Компьютерное моделирование и оптимизирование составов композиционных строительных материалов: монография / В.В. Белов. М.: АСВ, 2015. 264 с.
2. Бормотов, А.Н. Математическое моделирование и многокритериальный синтез строительных материалов специального назначения / А.Н. Бормотов // Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. М.: РАН, 2009. 56 с.
3. Сидоров, В.Н. Математическое моделирование в строительстве: учеб. пособие / В.Н. Сидоров, В.К. Ахметов. М.: АСВ, 2007. 337 с.
4. Уздин, В.М. Математическое моделирование. Метод анализа размерности: учебно-метод. пособие / В.М. Уздин. СПб.: Университет ИТМО, 2019. 28 с.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ АСУ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА НА ОТХОДАХ ПРОИЗВОДСТВА
МИНЕРАЛОВАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

В.В. Белов, Д.Г. Абрамов

ВВЕДЕНИЕ

С течением времени требования к бетону сильно возрастают. Ухудшающаяся экологическая ситуация отягощает ситуацию: как правило, мусор складывается на полигонах и в итоге там же захороняется. Это относится и к промышленным отходам, в частности, к отходам производства минераловатных изделий (ОПМИ). Появляется необходимость разрабатывать эффективные и экономичные бетоны за счет использования различных отходов. Осуществлять же производство таких бетонов наиболее эффективно за счет различных методов автоматизации [1–3]. Особенно актуальна сегодня автоматизация производств бетонов с применением различных волокон, так как они активно внедряются в различные области строительства. Такие бетоны могут обладать большой прочностью и долговечностью, но для достижения желаемых характеристик волокна должны быть как можно более равномерно распределены в бетонной смеси [4]. В особенности данное утверждение касается волокнистых базальтовых отходов (ВБО) [5–7], о которых далее пойдет речь. Известно, что этот вид волокон плохо распределяется в бетонной смеси [9]. Кроме того, концентрация ВБО сильно влияет на качество получаемого бетона.

Технология приготовления играет ключевую роль в производстве фибробетонов (бетонов с использованием волокон) [4]. Когда речь заходит о производстве бетона с использованием ОПМИ, то появляется насущная необходимость включения дополнительных и вспомогательных операций в процесс производства. Требуется усовершенствование существующих автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) путем разработки и внедрения в них новых технологических операций (подготовка ОПМИ, в частности ВБО, их оптимальная дозировка и эффективный способ введения в бетонную смесь с последующим перемешиванием наиболее эффективным способом, что имеет чрезвычайно важную роль в формировании физико-механических свойств бетона) для того, чтобы изготовить рассматриваемый в данной работе мелкозернистый бетон.

Волокнистые базальтовые и пылевидные базальтовые отходы возможно использовать как эффективную комплексную добавку в мелкозернистый бетон. Пылевидные базальтовые отходы – активный

минеральный тонкодисперсный микронаполнитель, улучшающий структуру цементного камня, а ВБО – дисперсно-микроармирующие элементы, повышающие прочность и жесткость композита. Возможность использования ОПМИ как в тяжелых, так и в легких бетонах уже доказана и отражена в научных работах [6–10]. Использование данных отходов в качестве комплексной добавки значительно повышает прочностные характеристики цементного композита, приносит большой экономический эффект в производстве и помогает значительно сократить пагубное влияние на окружающую среду путем переработки ОПМИ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наиболее полное раскрытие потенциала применения ОПМИ в технологии бетона возможно только при условии реализации АСУ ТП производства бетонных смесей, осуществляющей эффективный контроль и управление технологическим процессом, начиная от подачи материалов со складов и заканчивая выдачей бетонной смеси потребителям, что позволяет обеспечить экономичность, ритмичность производства и качество выпускаемой продукции. Создание концепции АСУ ТП производства мелкозернистого бетона на отходах производства минераловатных изделий и являлось целью данной работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлена схема информационных логических связей при формировании структуры фибробетона с использованием ОПМИ, основанная на соответствующих результатах экспериментальных исследований [8].

Предлагаемая модель, реализующая комплексный подход, устанавливает взаимосвязь между физико-химическими предпосылками формирования структуры фибробетона, структурообразованием и свойствами материала. Формирование микро- и макроструктуры фибробетона осуществляется за счет четких и отлаженных технологических процессов приготовления композита, в особенности таких важнейших из них, как подготовка ОПМИ, в частности ВБО, их оптимальная дозировка и эффективный способ введения в бетонную смесь с последующим перемешиванием наиболее эффективным способом, при котором все компоненты смеси распределяются как можно однороднее. Структура определяет выходные факторы, то есть основные свойства фибробетона: среднюю плотность, пределы прочности на сжатие и на растяжение при изгибе, деформационные характеристики (усадку и ползучесть), теплопроводность, морозостойкость, водопроницаемость, трещиностойкость.

Общим требованием ко всем композициям для изготовления высококачественных высокотехнологичных бетонов является оптимизация

гранулометрического состава заполнителей с целью обеспечения наиболее плотной упаковки зерен. В связи с этим для обеспечения наибольшей компактности и однородности структуры бетона необходима такая оптимальная гранулометрия, при которой учитываются как мелкие, так и крупные частицы.

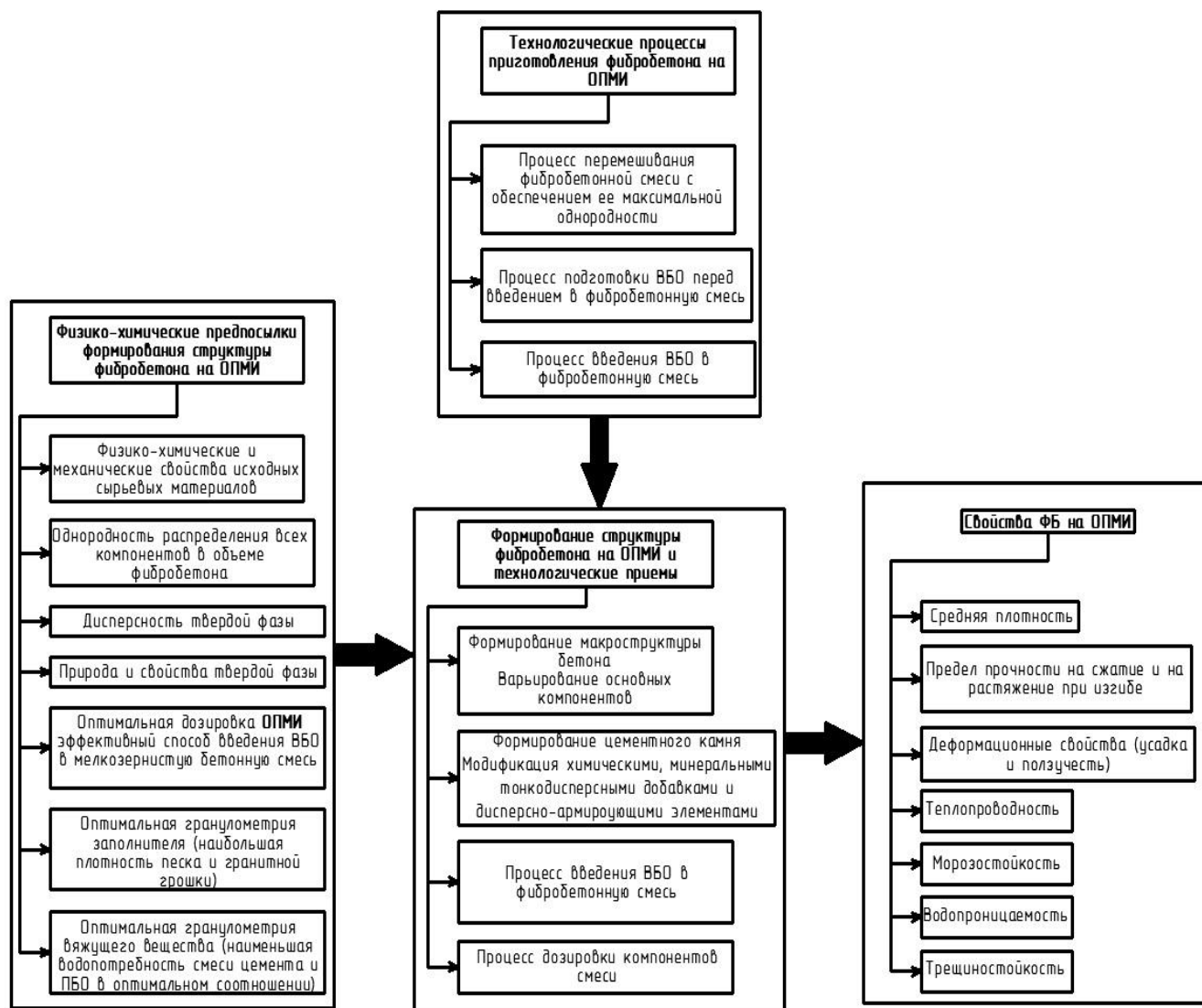


Рис. 1. Схема информационных логических связей при формировании структуры фибробетона с использованием ОПМИ

В процессе производства фибробетона с использованием ОПМИ необходимо также использовать оптимальное соотношение между компонентами минерального скелета для достижения наилучшего эффекта. В нашей работе были определены оптимальные распределения сферических частиц по размерам на основании «идеальных» гранулометрических кривых и выявлена наиболее плотная система. Причем построение геометрической модели происходило в соответствии с блок-схемой алгоритма, изображенного на рис. 2 [11].

Приведенный алгоритм (рис. 2) будет в дальнейшем использоваться в производстве рассматриваемого в данной работе мелкозернистого бетона с применением ОПМИ.

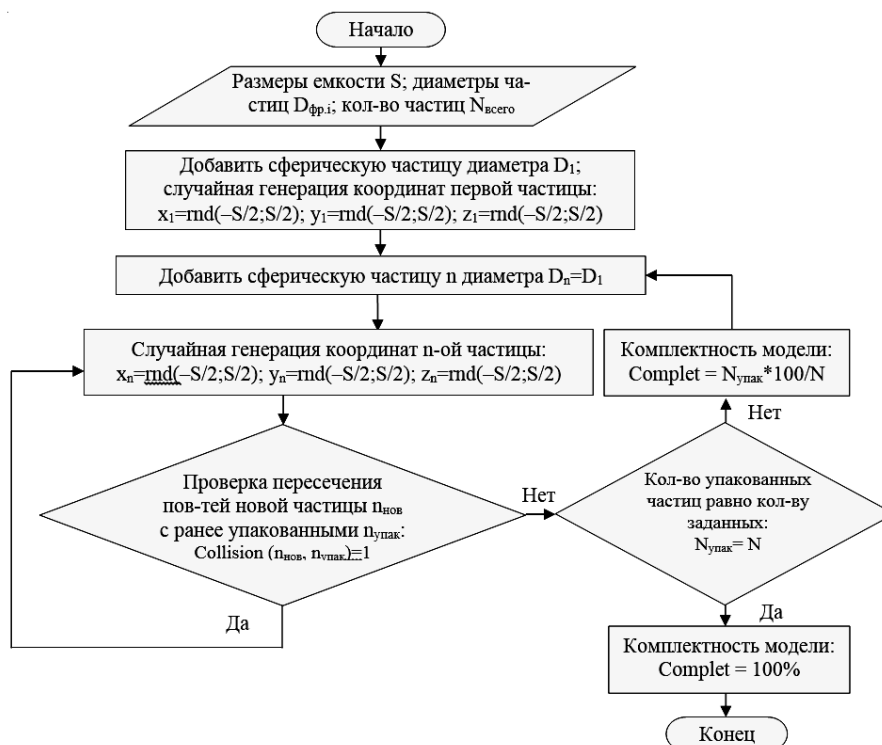


Рис. 2. Блок-схема алгоритма моделирования системы сфер в ограниченном объеме

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная в данной работе концепция АСУ ТП производства мелкозернистого бетона на ОПМИ описывает важнейшие этапы производства бетона на заводе-изготовителе. Концепция включает в себя подробное описание важнейших этапов приготовления бетонной смеси, которые должны быть учтены в АСУ ТП. Разработаны технологические основы, необходимые для автоматизации бетонного производства.

Описанный в статье подход позволяет сократить ручной труд, увеличить эффективность, получить экономический и экологический эффект, а также улучшить контроль за расходом сырья и выработкой продукции.

Библиографический список

1. Остроух, В.А., Проектирование автоматизированной системы управления заводами и установками по производству растворных и бетонных смесей / А.В. Остроух [и др.] // Строительные материалы. 2015. № 10. С. 70–74.
2. Остроух, А.В. Автоматизированная система управления бетонным заводом с двумя бетоносмесительными узлами / А.В. Остроух,

И.В. Недосеко, А.А. Айсарина // В мире научных открытий. 2015. № 8.1 (68). С. 316–326.

3. Кабир, М.Р. Автоматизированная система управления бетонным заводом / М.Р. Кабир, М.И. Исмоилов, А.В. Остроух // Автоматизация и управление в технических системах. 2014. № 3 (11). С. 178–190.

4. Пухаренко, Ю.В. Особенности приготовления фибробетонных смесей / Ю.В. Пухаренко // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 1 (30). С. 157–162.

5. Пат. Российская Федерация. Состав сырьевой смеси для изготовления неавтоклавного газобетона / Белов В.В., Али Рушди Ахмед. № 2616303. 2017. Бюл. № 11.

6. Белов, В.В. Влияние волокнистых базальтовых отходов на характеристики неавтоклавного газобетона / В.В. Белов, Р.А. Али, А.В. Еремин // Научное обозрение. 2016. № 15. С. 48–53.

7. Белов, В.В. Дисперсно-армированный газобетон с использованием базальтовых отходов / В.В. Белов, Р.А. Али // Цемент и его применение. 2016. № 3. С. 102–105.

8. Белов, В.В. Влияние волокнистых базальтовых отходов на прочностные характеристики высокопрочного многокомпонентного мелкозернистого бетона / В.В. Белов, Д.Г. Абрамов, Р.А. Али // Фундаментальные основы строительного материаловедения: сборник докладов международного онлайн-конгресса. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017. С. 268–273.

9. Магеррамова, И.А. Применение базальтовой ваты в сооружениях АЭС / И.А. Магеррамова, С.А. Ращепкина // Молодой ученый. 2015. № 23.1. С. 33–35.

10. Сошкина, Г.Н. Легкие бетоны неавтоклавного твердения на основе зол и отходов производства минеральной ваты: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Сошкина Галина Николаевна. Новосибирск, 2002. 147 с.

11. Белов, В.В. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учеб. пособие / В.В. Белов, И.В. Образцов, В.С. Иванов. Тверь: ТвГТУ, 2015. 102 с.

УДК 691.539

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУРЫ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В.В. Белов

ВВЕДЕНИЕ

Технология изготовления традиционных стеновых материалов, получаемых методом полусухого прессования (керамического кирпича и плитки, силикатного кирпича и др.), характеризуется высоким расходом

энергоносителей. В технологии прессования большое значение имеет подбор оптимальной влажности смеси с целью получения наибольшей плотности прессовки после снятия давления [1].

Формирование структуры сырьевой смеси, которая во многом наследуется в структуре и свойствах готовых изделий, происходит под влиянием аутогезии частиц порошка. Аутогезия представляет собой силовое взаимодействие между контактирующими частицами и определяется разрывной прочностью контактов между ними. Сила аутогезии складывается из сил различной природы: молекулярного взаимодействия (силы Ван-дер-Ваальса и когезии), электрических, капиллярных и механического зацепления. Аутогезия определенного порошкового материала может быть обусловлена действием нескольких сил одновременно. Взаимно исключаются только электрические и капиллярные силы [2, 3].

Аутогезия в технологических процессах оказывает как положительное, так и отрицательное влияние. В случаях когда необходимо уменьшить дисперсность порошков или предотвратить расслаивание порошковой смеси, аутогезия оказывает благоприятное влияние. В то же время в процессах смешивания однородность смеси может существенно нарушаться в результате образования агрегатов [2, 4–6, 8, 9]. Силы аутогезии способствуют слеживанию, образованию арочных структур, образованию сводов при истечении порошков из бункеров и иных емкостей [2, 5–7, 10–13].

Исследование влияния аутогезии порошковых материалов на структуру и свойства сырьевой смеси в технологии прессованных керамических изделий является актуальной задачей для оптимизации рецептуры смеси и самой технологии. Это объясняется тем фактом, что технологические процессы переработки, хранения и транспортировки сырьевой смеси, а также формования изделий широко применяются при производстве не только керамики, но и огнеупоров, бетонов, композиционных материалов разного назначения, биоматериалов, электроники, продуктов питания и косметики; везде достоверно установлено значение сил аутогезии [2, 6, 14].

Структурообразование в дисперсных системах является результатом сил межчастичного взаимодействия: межмолекулярного, электрического, капиллярного. Хотя большое количество исследований посвящено изучению адгезии частиц (аутогезии) в дисперсных системах, конкретные вопросы, связанные с типом структурных элементов и структур в результате доминирующей роли капиллярных сил адгезии в структурообразовании, до недавнего времени подробно не рассматривались. Так же, как структуры, образовавшиеся в результате коагуляции, называются коагуляционными, структуры, образовавшиеся в результате действия сил капиллярной связи, мы предложили называть капиллярными [15].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе изучался пресс-порошок, полученный сушкой распылением керамического шликера в производстве облицовочных плиток. Химический состав пробы пресс-порошка приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав пресс-порошка
в производстве керамических плиток

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O ₃	ппп
59.56	19.8	1.0	2.44	2.19	6.26	8.39

Зерновой состав пресс-порошка определяли при помощи набора сит с размерами ячеек: 1; 0.5; 0.25 и 0.1 мм. По данным рассева пресс-порошка рассчитывали частные остатки в процентах, равные отношению остатков на данных ситах к общей массе навески, которая составляла 200 г, а также полные остатки в процентах, равные сумме частных остатков на данных ситах и на ситах с большим размером ячеек. В табл. 2 приведен гранулометрический состав пресс-порошка, использованного в работе.

Таблица 2. Гранулометрический состав керамического пресс-порошка

Размеры ячеек сита, мм	Частные остатки, %	Полные остатки, %
1	0.025	0.025
0.5	1.325	1.35
0.25	63.375	68.725
0.1	25	93.725

Данные табл. 2 свидетельствует о том, что около 70 % пресс-порошка имеет размеры гранул от 0.25 до 0.5 мм.

Технологическими свойствами пресс-порошка являются его насыпная плотность, сыпучесть и угол естественного откоса. Насыпную плотность определяли по известной методике, заключающейся в засыпке цилиндрического стакана емкостью 50 см³ из воронки с диаметром отверстия 15 мм. Воронку устанавливали на 10 см выше верхнего края стакана, через нее в стакан засыпали 150 г пресс-порошка. После наполнения стакана с образованием излишков пресс-порошка в виде конуса его срезали вровень с краями стакана без уплотнения пресс-порошка.

Насыпную плотность пресс-порошка ρ_n в пересчете на сухое вещество вычисляли по формуле

$$\rho_n = \frac{m_1 - m_2}{50(1 + W)},$$

где m_1 – масса сосуда с пресс-порошком, г; m_2 – масса сосуда, г; W – влажность пресс-порошка.

Для определения пористости отдельных гранул пресс-порошка и пресс-порошка в целом в данной работе предложена специальная

методика. Как известно, пористость, или пустотность, Π сыпучего материала определяется по формуле

$$\Pi = (\rho - \rho_n / \rho) \cdot 100, \quad (1)$$

где ρ – истинная плотность; ρ_n – насыпная плотность.

Объем гранул вместе с порами определялся в том же объемном измерителе при его заполнении керосином. Порошок перед засыпкой увлажнялся до 10 %, что примерно соответствует заполнению пор в гранулах водой. Поскольку вода и керосин взаимно несмачиваемые и несмешиваемые жидкости, то влажные гранулы в керосине сохраняли свою форму и вытесняли керосин на величину, численно равную своему объему вместе с внутренними порами. По указанной выше влажности пересчитывали высыпанную в измеритель навеску пресс-порошка на сухое вещество, а отношение последнего к вытесненному объему керосина принимали за плотность гранул пресс-порошка.

Пористость гранул Π_r рассчитывается по формуле

$$\Pi_r = \frac{\rho - \rho_r}{\rho} \cdot 100,$$

где ρ_r – плотность гранул пресс-порошка.

Межзерновая пористость (пустотность) $\Pi_{мз}$ пресс-порошка в свободно насыпанном состоянии определяется по формуле

$$\Pi_{мз} = \frac{\rho_r - \rho_n}{\rho} \cdot 100.$$

Общая пористость пресс-порошка в уплотненном состоянии вычисляется по формуле, аналогичной (1), только вместо ρ_n в эту формулу подставляется средняя плотность уплотненного пресс-порошка ρ_0 .

В экспериментах по изучению влияния влажности пресс-порошка на его свойства и уплотнение дополнительное увлажнение пресс-порошка производилось пульверизацией. После увлажнения для отделения незначительного количества комков пресс-порошок пропускали через сито 1.25 мм. С целью получения влажности, меньшей по сравнению с естественной, пресс-порошок подсушивали в комнатных условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рис. 1 показывает, что значения насыпной плотности пресс-порошка зависят от способа ее измерения. Поэтому использование данных, полученных в условиях лаборатории, при расчете реальных условий засыпки пресс-порошка в пресс-формы прессов возможно только после изучения этих условий и их моделирования. В то же время эту характеристику пресс-порошка первым способом (через воронку) при влажности пресс-порошка более 16 % из-за сильного комкования измерить нельзя; для выявления зависимости во всем диапазоне влажности необходимо воспользоваться желобом. В этом случае обнаруживается

минимум насыпной плотности пресс-порошка при влажности около 17 %, затем эта плотность пресс-порошка резко возрастает.

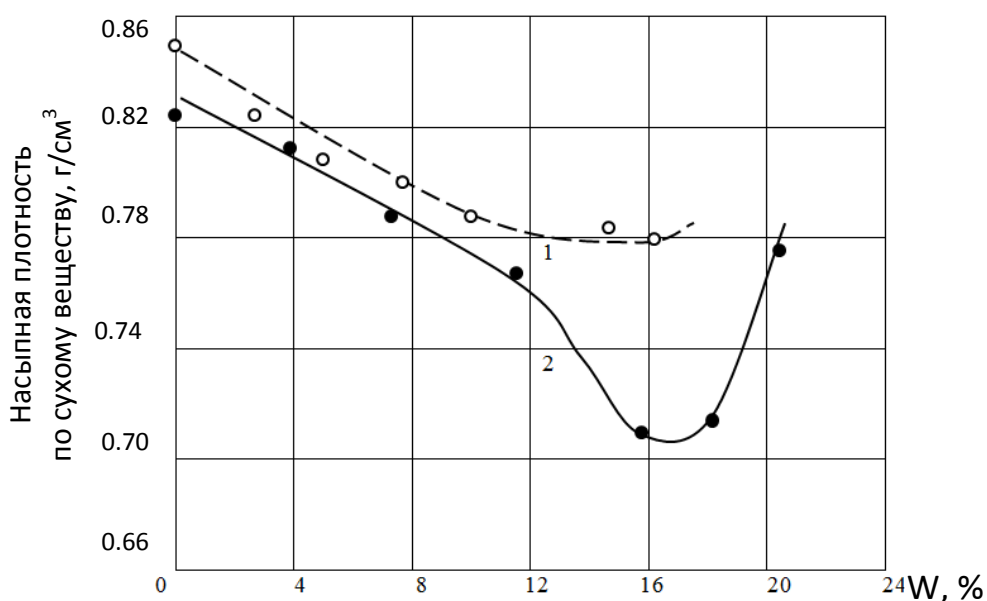


Рис. 1. Зависимости насыпной плотности пресс-порошка по сухому веществу от влажности при измерениях с воронкой (1) и желобом (2)

Результаты измерений сыпучести и угла естественного откоса пресс-порошка при изменении влажности от 2 до 15 % показали, что эти характеристики мало зависят от влажности в указанном диапазоне и равны 45–46 г/с и 20–22° соответственно [16].

Значения насыпной плотности пресс-порошка, плотности его гранул, а также межзерновой пористости (пустотности) пресс-порошка и пористости гранул при истинной плотности керамического вещества 2.52 г/см³ приведены в табл. 3.

Таблица 3. Значения насыпной плотности пресс-порошка, плотности его гранул, межзерновой пористости (пустотности) пресс-порошка и пористости гранул

Влажность пресс-порошка W, %	ρ_n , г/см ³	ρ_g , г/см ³	$\Pi_{мз}$, %	Π_g , %
0	0.85	1.80	52.8	28.6
4.8	0.813		54.8	
7.7	0.805		55.3	
10	0.792		56.0	
16	0.785		56.5	

Расчетные данные показывают, что пористость гранул составляет около 30 % общей пористости пресс-порошка в свободном насыпном состоянии. Этот показатель является важной характеристикой пресс-порошка, отражающей его микроструктуру, в то время как насыпная

плотность пресс-порошка, характеризующая макроструктуру, зависит прежде всего от зернового состава пресс-порошка.

По гранулометрическому составу пресс-порошка определен, согласно методике [16, 17], объемно-поверхностный диаметр или средневзвешенный размер гранул:

$$d_{3,2} = \frac{\sum g_i}{\sum \frac{g_i}{d_i}},$$

где g_i – доля гранул диаметром d_i , % по массе; d_i – средний размер для частного остатка пресс-порошка, мм.

Значения объемно-поверхностного диаметра гранул пресс-порошка и пористости гранул в различных пробах пресс-порошка (табл. 4) показывают, что имеется определенное соответствие между этими значениями: пористость гранул снижается по мере уменьшения размера гранул, что подтверждается литературными данными [17].

Таблица 4. Объемно-поверхностный диаметр и пористость гранул пресс-порошка в различных пробах и фракциях

Номер пробы	Объемно-поверхностный диаметр порошка, мм	Пористость тела гранул, %	Фракции, мм	Пористость тела гранул, %
1	0.281	29.9	1–0.5	33.2
2	0.303	32.9	0.5–0.315	33.0
3	0.298	31.4	0.315–0.25	30.6
4	0.299	32.9	0.25–0.1	25.8

На рис. 2 приведены зависимости предельного напряжения сдвига, определенные с помощью пенетрационного реометра ПРБ-2 [17], от влажности пресс-порошка при различной плотности образцов после прессования: 0.95; 1.0; 1.05 и 1.1 г/см³. Данные показывают, что при увеличении влажности значения предельного напряжения сдвига, а также величина капиллярного сцепления в данных системах увеличиваются, достигают максимума при определенной влажности W_{mc} , а затем уменьшаются.

Из теории капиллярного сцепления следует, что капиллярная аутогезия между двумя шарообразными частицами имеет наибольшую величину в момент образования жидкостного мениска в зоне их контакта. Очевидно, что мениск между гранулами пресс-порошка образуется после заполнения их пор влагой. Рассчитаем влажность W_{mc} пресс-порошка, соответствующую этому моменту, по формуле

$$W_{mc} = \Pi_r \cdot \rho_j / \rho_r, \quad (2)$$

где ρ_j – плотность жидкой фазы (воды).

Подставив значения Π_r и ρ_r , приведенные в табл. 3, получим значение $W_{мс}$, равное 15.9 %, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными (рис. 2).

Таким образом, капиллярное сцепление, являющееся основой прочности свежеформованного полуфабриката, имеет максимальное значение при определенной влажности, величину которой можно рассчитать по формуле (2).

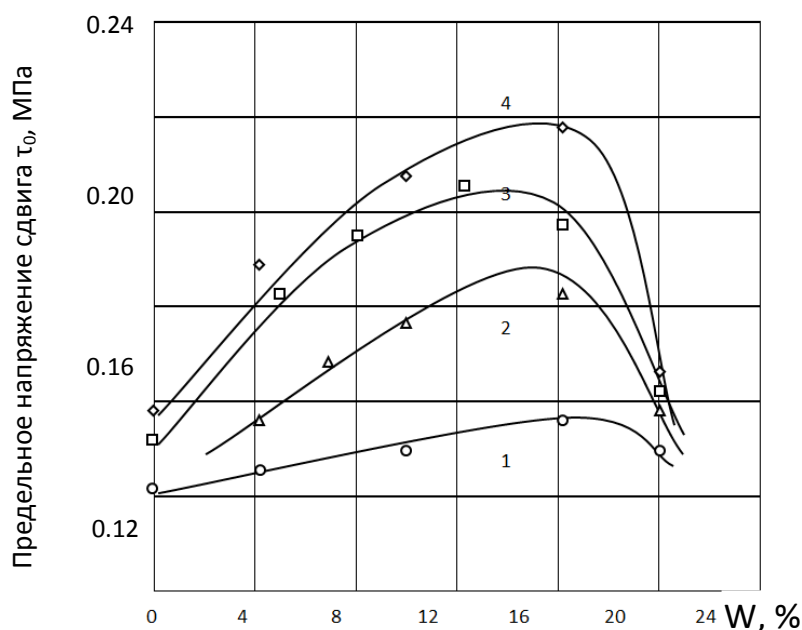


Рис. 2. Предельное напряжение сдвига пресс-порошка в зависимости от влажности при различной плотности прессованных образцов, г/см³: 0.95 (1); 1.0 (2); 1.05 (3) и 1.1 (4)

Зависимости плотности пресс-порошка в уплотненном состоянии от влажности (рис. 3) показывают, что с увеличением влажности этого порошка его плотность увеличивается, достигает максимума при определенной влажности, а затем уменьшается.

На рис. 3 пунктирная линия соответствует критической влажности, при которой система при данном давлении прессования будет иметь двухфазное состояние и максимальную плотность. При двухфазном состоянии системы все поры насыщаются водой. Вплоть до данного состояния при увеличении влажности плотность пресс-порошка в уплотненном состоянии возрастает. Эти зависимости существенно отличаются от зависимостей насыпной плотности пресс-порошка (см. рис. 1), характеризующихся минимумом насыпной плотности при влажности, близкой к значению $W_{мс}$.

Эти различия объясняются тем, что при свободной засыпке с ростом влажности до указанной влажности, соответствующей максимуму капиллярного сцепления, происходит увеличение агрегирования пресс-

порошка под действием капиллярной аутогезии, в то время как при уплотнении пресс-порошка из пластичного глиняного сырья определяющее значение имеет уменьшение сил внутреннего трения между частицами с сохранением аутогезионных связей.

Прессование керамических пресс-порошков при давлениях, принятых в производстве керамических изделий, критические значения влажности в 1.5–2 раза меньше влажности $W_{мс}$. Таким образом, достижение системой максимальной плотности происходит задолго до той влажности, при которой капиллярное сцепление может достичь своего максимума, что проявляется в случае зависимостей насыпной плотности пресс-порошка.

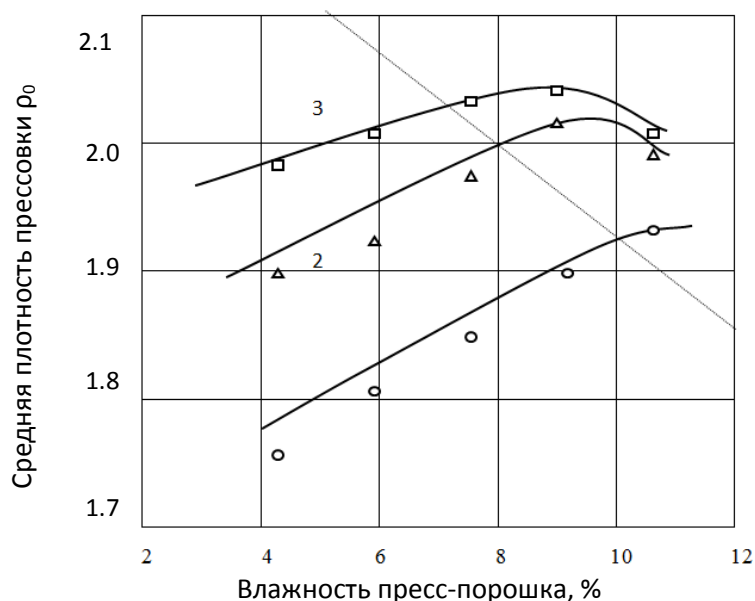


Рис. 3. Зависимости плотности пресс-порошка в уплотненном состоянии от влажности при давлении прессования, МПа: 10 (1), 20 (2) и 30 (3)

Следовательно, при реальных условиях прессования керамических пресс-порошков необходимо определять критические значения влажности, которые соответствуют не только максимально возможному уплотнению прессовки, но и максимально возможному в данных условиях значению капиллярного сцепления. Эти значения влажности являются наилучшими также для увеличения прочности готовых изделий [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прессование сырьевой смеси оптимальной влажности способствует перестройке макроструктуры смеси, прежде всего снижая количество макропор и повышая прочность контактных зон, а также среднюю плотность прессовки. При этом прочность керамических изделий с оптимальной структурой будет максимальной, что будет обеспечивать снижение энергоемкости изделий и повышение их качественных показателей.

Библиографический список

1. Миронов, В.А. Оптимизирование композиций для изготовления строительных смесей: научное издание / В.А. Миронов [и др.]. СПб.: Квинтет, 2008. 416 с.
2. Зимон, А.Д. Аутогезия сыпучих материалов / А.Д. Зимон, Е.И. Андрианов. М.: Metallurgia, 1978. 288 с.
3. Удалов, Ю.П. Технология неорганических порошковых материалов и покрытий функционального назначения: учеб. пособие / Ю.П. Удалов [и др.]. СПб.: Янус, 2001. 428 с.
4. Zimon, A.D. Adhesion of dust and powder / A.D. Zimon. Springer Science & Business Media, 2012.
5. Li, Hongming. Impact of cohesion forces on particle mixing and segregation / Hongming Li. Diss. University of Pittsburgh, 2006.
6. Halidan, M. The effect of interparticle cohesion on powder mixing in a ribbon mixer / M. Halidan [et al.] // *AIChE Journal*. 2016. Vol. 62. № 4. P. 1023–1037.
7. Podczeck, F. Adhesion and autoadhesion measurements of micronized particles of pharmaceutical powders to compacted powder surfaces / F. Podczeck, J.M. Newton, M.B. James // *Chemical and pharmaceutical bulletin*. 1995. Vol. 43. № 11. P. 1953–1957.
8. Bridgwater, J. Fundamental powder mixing mechanisms / J. Bridgwater // *Powder Technology*. 1976. Vol. 15. № 2. P. 215–236.
9. Orr, N.A. Mixing of cohesive powders / N.A. Orr, E. Shotton // *Chemical Engineer-London*. 1973. № 269. P. 12–19.
10. Parteli, E.J.R. Attractive particle interaction forces and packing density of fine glass powders / E.J.R. Parteli [et al.] // *Scientific reports*. 2014. Vol. 4. P. 6227.
11. Ku, N. Auto-granulation of fine cohesive powder by mechanical vibration / N. Ku [et al.] // *Procedia engineering*. 2015. Vol. 102. P. 72–80.
12. Ku, N. Evaluation of the behavior of ceramic powders under mechanical vibration and its effect on the mechanics of auto-granulation / N. Ku. Rutgers The State University of New Jersey-New Brunswick, 2015.
13. Castellanos, A. The relationship between attractive interparticle forces and bulk behaviour in dry and uncharged fine powders / A. Castellanos // *Advances in physics*. 2005. Vol. 54. № 4. P. 263–376.
14. Chirone, R. A comparison between interparticle forces estimated with direct powder shear testing and with sound assisted fluidization / R. Chirone [et al.] // *Powder Technology*. 2018. T. 323. P. 1–7.
15. Белов, В.В. Капиллярное структурообразование в дисперсных системах, применяемых для производства строительных материалов / В.В. Белов // *Известия вузов. Строительство*. 2002. № 9. С. 46–51.

16. Bornemann, R., Schmidt. Grundlagen und Strategien zur Verbesserung erdfeuchter Betone / Bornemann, R., Schmidt // Betonwerk + Fertigteil-Technik. 2005. Teil I. Heft 8. P. 44–51.

17. Берней, И.И. Теория работы конического пластометра, основанная на истинной картине деформирования среды / И.И. Берней, В.В. Белов // Физико-химическая механика. 1982. № 10. С. 12–14.

18. Суслов, А.А. Роль внутренних сил в процессах раннего структурообразования керамических формовочных масс / А.А. Суслов, Е.И. Шмитько, А.Т. Важинский // Известия вузов. Строительство. 1998. № 11–12. С. 63–68.

УДК 691.5

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЫЛИ НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ АНГИДРИТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

А.Ф. Бурьянов, Д.И. Ткаченко

Ангидрит является вяжущим веществом, которое не требует предварительной термической обработки. Однако гидратация ангидрита длится очень долго и не обеспечивает переход безводного сульфата кальция в дигидрат в полном объеме. В связи с этим существует два основных способа ускорения гидратации и активации твердения ангидритового вяжущего: увеличение тонкости помола, введение различных активаторов твердения.

С целью повышения физико-механических свойств ангидритовых композиций используют активацию ангидрита в сочетании с добавлением в его состав тонкодисперсных модификаторов.

Одним из самых эффективных модификаторов является металлургическая пыль. При ее введении в гипсовое вяжущее наблюдается рост прочности на сжатие до 65 % и рост водостойкости материала.

Высокая дисперсность металлургической пыли позволяет использовать ее как модифицирующую добавку при изготовлении минеральных вяжущих и керамики, а также других строительных материалов.

Показатели, полученные при испытании ангидритовых композиций с ультрадисперсной добавкой и различных активаторов приведены, на рис. 1. При активации ангидрита бисульфитом натрия и добавлении металлургической пыли прочность на сжатие образцов, согласно данной зависимости, возрастает на 71 %, а при щелочной активации – на 53 %. Прочностные же характеристики вяжущего при добавлении металлургической пыли с активацией сульфатом железа понижаются. Предел прочности на сжатие становится максимальным при 3 % металлургической пыли в составе ангидритовой композиции.

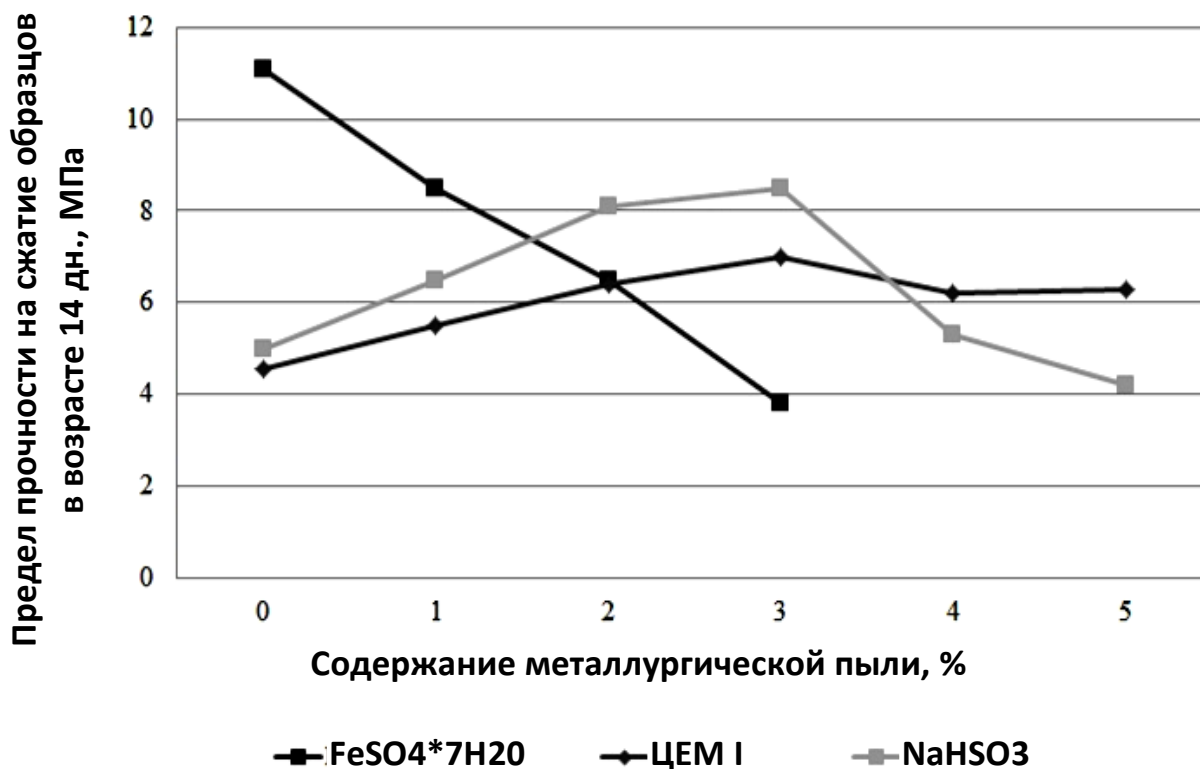


Рис. 1. Зависимость прочностных характеристик ангидритового вяжущего при комплексной активации твердения от содержания металлургической пыли в возрасте 14 сут

Таким образом, в последующих исследованиях наиболее логично использовать в качестве активатора твердения ангидритовых композиций именно гидросульфит натрия. Этот активатор твердения имеет хорошую реакционную способность, что существенно сказывается на процессах гидратации, так как приостанавливается структурообразование на ранних сроках из-за выделения одноименных ионов SO_4^{2-} . При продолжительных сроках твердения ангидритовых композиций образуются куда более совершенные кристаллы новообразований, что способствует образованию плотной и прочной матрицы.

Повторные испытания образцов на основе ангидритовых композиций были проведены в возрасте 96 сут. Результаты приведены на рис. 2.

По графику можно сделать следующие выводы: при содержании добавки от 0 до 1% идет монотонное повышение прочностных показателей ангидритового вяжущего, прирост прочности на изгиб и сжатие составляет 122 и 42% соответственно, при дальнейшем увеличении добавки происходит падение прочности.

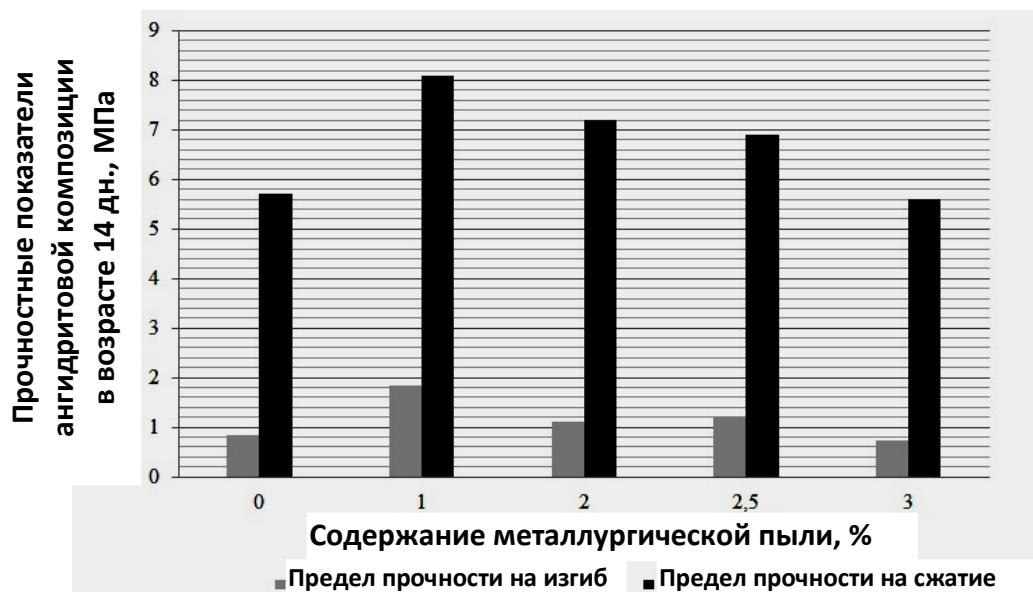


Рис. 2. Зависимость прочности ангидритового вяжущего от содержания металлургической пыли

Улучшение механических свойств может происходить двумя путями: добавка позволяет повысить растворимость ангидритового вяжущего или же она оказывает структурирующее влияние, что способствует увеличению площади межфазной поверхности и образованию более прочных контактов.

Поскольку при увеличении возраста образцов их прочностные показатели улучшаются, то механизм, оказывающий структурирующее воздействие на гипсовую матрицу, оказывается более предпочтительным вследствие того, что со временем действие гидроксида кальция прекращается, а ультрадисперсные частицы оксида железа помогают уплотнению матрицы за счет образования сульфата железа (III). Он активизирует гидратацию природного ангидрита, что позволяет заполнить поры и дефекты структуры новообразованиями.

Характеристики водостойкости определялись в ходе эксперимента. Полученные данные приведены в таблице.

Характеристики водостойкости исследуемых композиций

№	Содержание металлургической пыли, %	Водопоглощение, %, через			Коэффициент размягчения
		4 ч	24 ч	48 ч	
1	0	9.85	9.84	9.74	0.3
2	1	9.92	9.60	8.89	0.26
3	2	10.21	10.11	9.59	0.25
4	2,5	10.85	10.74	10.11	0.26
5	3	11.12	10.40	10.20	0.21

Из полученных значений видно, что у исследуемых композиций водопоглощение меняется в пределах 8.88...11.11 %, а это незначительно больше аналогичной характеристики контрольного образца. Для

исследуемой композиции на основе ангидрита коэффициент размягчения уменьшается с увеличением содержания добавки металлургической пыли.

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что оптимальные значения прочностных характеристик достигаются при содержании 1 % металлургической пыли в составе ангидритовой композиции. Опираясь на исследования можно сделать вывод, что увеличение прочности можно связать с образованием сульфата железа (III), о чем говорит окраска материала в красно-коричневый цвет.

Библиографический список

1. Будников, П.П. Ангидритовый цемент / П.П. Будников, П.С. Зорин. М.: Государственное издательство литературы по строительным материалам, 1954. 92 с.

2. Токарев, Ю.В. Композиционные материалы на основе сульфата кальция, модифицированные ультрадисперсными минеральными порошками / Ю.В. Токарев. Пермь: ПГТУ, 2010. 18 с.

3. Маева, И.С. Модификация ангидритовых композиций ультра- и нанодисперсными добавками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Маева Ирина Сергеевна. Казань, 2010. 21 с.

4. Юдина, Л.В. Металлургические и топливные шлаки в строительстве / Л.В. Юдина, А.А. Юдин. Ижевск: Удмуртия, 1995. 160 с.

УДК 666.941.4:539.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ КОНТАКТОВ В ТВЕРДЕЮЩИХ СИСТЕМАХ

*М.С. Гаркави, А.В. Артамонов, Е.В. Колодежная,
А.В. Пуриева, М.А. Ахметзянова*

ВВЕДЕНИЕ

Использование строительных материалов и изделий в новом строительстве и при реконструкции зданий и сооружений требует от их производителя обеспечения заданных физико-технических и эксплуатационных свойств. Эти свойства материалов определяются их структурой, следовательно, в результате ее направленного изменения можно добиться их существенного улучшения. Структура большинства строительных материалов, представляющих собой дисперсные системы, формируется за счет взаимодействия зерен твердой фазы, а также их взаимодействия с дисперсионной средой [1]. При протекании процесса структурообразования таких дисперсных систем происходит изменение различных структурных состояний твердеющей системы, причем для каждого из них характерно преобладание определенного типа межчастичных контактов.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Структурообразование, как и всякий термодинамический процесс, возможно выразить в терминах химических реакций, то есть изменение структурного состояния твердеющей дисперсной системы можно представить совокупностью следующих квазиреакций:



где A_1 – точечные контакты в исходной дисперсной системе; A – коагуляционные контакты; B – коагуляционно-конденсационные контакты; E – конденсационно-кристаллизационные контакты.

Квазиреакцией (1) описывается формирование контакта при смешении дисперсной фазы с дисперсионной средой, называемого истинным коагуляционным. Подобное взаимодействие представляет собой обычную реакцию первого порядка. Кинетика такой реакции описывается уравнением

$$A(\tau) = A_0 [1 - \exp(-k_1 \tau)], \quad (5)$$

где A_0 – концентрация атомных контактов в исходной дисперсной системе; k_1 – постоянная скорости реакции.

В пределе число формирующихся коагуляционных контактов будет стремиться к концентрации точечных контактов A_0 . Значит, идеальная система будет представлять собой дисперсию, где все частицы твердой фазы окружены оболочками жидкости. Тогда величина A_0 определяется соотношением [2]

$$A_0 = \frac{x_0 * \gamma_x^2 * s_0^3}{m_x}, \quad (6)$$

где x_0 – объемная концентрация дисперсной фазы; s_0 – удельная поверхность дисперсной фазы; γ_x – плотность твердых частиц; $m_x = 6...10$ – коэффициент конфигурации частиц.

В соответствии с (6) при прочих равных условиях число точечных и коагуляционных контактов определяется главным образом размером частиц. Очевидно, что при наличии в твердеющей дисперсии ультрадисперсных и наноразмерных частиц значение A_0 возрастает вследствие их высокой удельной поверхности. Это будет отражаться на кинетике образования коагуляционных контактов, что закономерно. Эти частицы могут образовываться как при химическом взаимодействии твердой и жидкой фаз (вяжущая система), так и при введении их извне в дисперсную систему. В результате увеличения концентрации дисперсной фазы в твердеющей системе происходит переход коагуляционного контакта по квазиреакции (2) в промежуточный коагуляционно-конденсационный, то есть имеет место образование псевдоконденсационной структуры [1]. Кинетика образования коагуляционно-конденсационных контактов описывается соотношением

$$B(\tau) = \frac{k_2(A_0 + B_0)}{k_2 + k_3} * \{1 - \exp(-(k_2 + k_3)\tau)\}, \quad (7)$$

где A_0 и B_0 – исходные концентрации коагуляционных и коагуляционно-конденсационных контактов соответственно.

Из соотношения (7) следует, что кинетика данного процесса в значительной степени определяется исходной концентрацией коагуляционных контактов, а она в свою очередь – величиной дисперсности твердой фазы. Поэтому уменьшение размера частиц твердой фазы и повышение их содержания в твердеющей системе способствуют ускорению структурных превращений.

Вследствие взаимодействия с имеющимися коагуляционными контактами, а также их уничтожения при образовании коагуляционно-конденсационных контактов происходит стимуляция своего «размножения». Данный процесс может быть описан автокаталитической квазиреакцией (3), то есть в твердеющей дисперсии осуществляется процесс по механизму положительной обратной связи. Образование коагуляционно-конденсационных контактов предопределяется в дисперсной системе возникновением при ее твердении зародышей контактов. Их образование стимулируют ультрадисперсные и наноразмерные частицы, присутствующие в системе [3, 4]. Коагуляционно-конденсационные контакты служат основой для образования конденсационно-кристаллизационных контактов по квази-реакции (4), поэтому в совокупности квазиреакции (3) и (4) представляют собой автокаталитический процесс с разветвлением [5].

Кинетика образования коагуляционно-конденсационных контактов по квазиреакции (3) описывается уравнением

$$B(\tau) = \frac{B_0(A_0 + B_0)}{B_0 + A_0 * \exp[-(A_0 + B_0)k_4\tau]}. \quad (8)$$

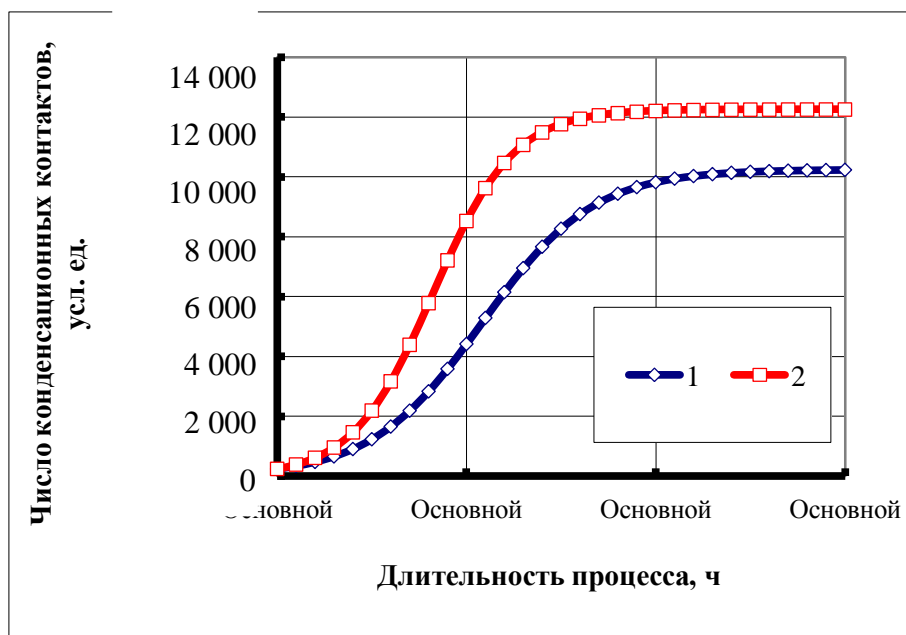
Поскольку в твердеющей системе нет внешнего притока вещества, то в ней наступает насыщение, соответствующее предельному количеству коагуляционно-конденсационных контактов. Образование структуры с коагуляционно-конденсационными контактами связано с закреплением в положении ближней и дальней коагуляции объектов твердой фазы [1]. Жидкая фаза, присутствующая в твердеющей системе, образует оболочки вокруг твердых частиц толщиной порядка $1 \cdot 10^{-8}$ м, что соответствует фиксации частиц в положении дальней коагуляции. Если же в твердеющей дисперсии присутствуют частицы с характерным размером около 100 нм, то расстояние между ними уменьшается на порядок и более, соответствующее ближней коагуляции. Вследствие этого возрастают силы сцепления в контакте между частицами и таким образом увеличивается прочность самого контакта. В результате физико-химических процессов, протекающих в твердеющей системе в дальнейшем, в ней происходит формирование конденсационно-кристаллизационной структуры в соответствии с квазиреакцией (4). Основой контактов в твердеющих

системах являются контактные зародыши, возникновение которых является энергетически более выгодным, нежели непосредственное срастание частиц, что показано в работе [2]. Возникновение контактных зародышей происходит на активных поверхностных центрах, которые непосредственно участвуют в формировании межчастичных контактов. Эффективным источником активных поверхностных центров для образования контактных зародышей являются наноразмерные частицы, введенные или образующиеся в твердеющих системах. Процесс формирования контактов из контактных зародышей можно представить как аналогию развития популяции. Процесс, описываемый дифференциальным уравнением Ферхюльста – Перла [5], дает возможность в твердеющей дисперсной системе оценить число контактов N_k :

$$N_k = \frac{N_m \cdot N_0}{N_0 - (N_0 - N_m) \cdot \exp(-k_N \cdot \tau)}, \quad (8)$$

где N_0 – число контактов в момент времени $\tau = 0$ (число контактных зародышей); N_m – предельное число контактов в твердеющей системе, соответствующее полному истощению контактных зародышей или активных центров; k_N – константа скорости образования контактов.

На основе соотношения (8) приведена на рисунке расчетная кинетика образования контактов в твердеющей системе (на примере гипсовой композиции [6])



Кинетика образования конденсационных контактов:
 исходная гипсовая дисперсия (1);
 гипсовая дисперсия с наноразмерными частицами (2)

Возрастание числа контактов в твердеющей системе закономерно сопровождается ростом ее прочности, а приведенные выше результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными [3, 6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для твердеющих систем характерна динамическая схема эволюции структурных состояний с межчастичными контактами различной природы и прочности. Развитие этих состояний имеет различную кинетику, что позволяет установить основные управляющие факторы.

Проведенный анализ кинетики формирования межчастичных контактов показал, что введение наноразмерных компонентов в твердеющую систему является действенным средством управления ее структурообразованием.

Библиографический список

1. Урьев, Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов / Н.Б. Урьев. М.: Химия, 1988. 256 с.
2. Полак, А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ / А.Ф. Полак. М.: Стройиздат, 1966. 208 с.
3. Гаркави, М.С. Влияние искусственного старения на формирование структуры гипсового камня / М.С. Гаркави, С.А. Некрасова, А.Ю. Панферова // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 24–25.
4. Чернышов, Е.М. Нанотехнологические исследования строительных композитов: общие суждения, основные направления и результаты / Е.М. Чернышов // Нанотехнологии в строительстве. 2009. № 1. С. 45–58.
5. Третьяков, Ю.Д. Процессы самоорганизации в химии материалов / Ю.Д. Третьяков // Успехи химии. 2003. Т. 72. № 8. С. 731–763.
6. Гаркави, М.С. Формирование структуры наномодифицированного гипсополимерного материала / М.С. Гаркави [и др.] // Сухие строительные смеси. 2013. № 2. С. 38–40.

УДК 691.3:691.542

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ГИДРАТИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА БЕТОНА

Е.С. Егоров, С.В. Самченко

ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач при разработке наилучших доступных технологий является минимизация негативного воздействия на окружающую среду. В промышленности готовых бетонных смесей существует проблема утилизации отходов, оставшихся в стационарных и самоходных бетоносмесительных узлах и бетоносмесителях. Слив в окружающую среду этих отходов после промывки оборудования влечет за собой серьезные последствия для окружающей среды. К негативному воздействию относятся цементация и изменение рН почвы, разрушение

плодородного слоя, загрязнение воды и др. Проблему утилизации отходов можно решить с помощью технологий рециклинга бетонной смеси.

Современные технологии рециклинга [1, 2] предполагают извлечение мелкого и крупного заполнителя из отходов бетонных смесей. Это извлечение осуществляется путем смывания с рабочих органов и емкостей смесителя отходов в систему просеивания и промывания. В результате отделившийся мелкий и крупный заполнитель повторно подается в бетоносмесительный узел, а вода с мельчайшими цементными частицами (цементной суспензией) перекачивается в специальный узел для отстаивания. После отстаивания воду повторно используют в процессах рециклинга. В таких технологиях не предполагается использовать остатки цемента и способы их утилизации.

Существует способ рециклинга смеси [3], предполагающий очистку емкостей от бетонных остатков в два этапа. Первый («сухая очистка») заключается в механической обработке поверхности емкости путем добавления в отходы бетонной смеси определенного количества свежего заполнителя и принудительного перемешивания. Получившуюся в результате этого смесь загружают в бетоносмеситель. Вторым этапом («мокрая очистка») является промывание емкости от оставшихся отходов, после которой получившуюся смесь также загружают в бетоносмеситель. После этого осуществляется дозировка цемента, добавок и воды. В этой технологии не учитывается влияние гидратированного цементного теста, которое в результате «сухой очистки» могло сформировать вокруг заполнителя оболочку, а также гидратированных цементных частиц, которые находятся во взвешенном состоянии в смеси, полученной при мокрой очистке. В связи с вышеописанными проблемами остаются нерешенными вопросы о возможности полного рециклинга бетонных смесей без потери качества продукта и повышении экологичности бетонной промышленности. На основании этого необходимо провести исследования влияния предварительно гидратированной цементной суспензии на свойства бетона.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На текущем этапе исследования было изучено влияние предварительно гидратированных цементных суспензий на свойства цементно-песчаных образцов.

Для исследования физико-химических закономерностей твердения вяжущих композиций использовался цемент марки 500 Д0 (СЕМ I 42,5 Н).

Химический и минералогический состав клинкера представлен в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Химический состав клинкера

Компоненты	ппп	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	R ₂ O
Клинкер	0.92	62.75	20.10	4.56	8.72	1.99	0.57	1.58

Таблица 2. Минералогический состав клинкера

Содержание минералов, %			
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
60,00	12,00	3,00	21,00

Получение предварительно гидратированной цементной добавки осуществлялось путем смешения цементной навески с водой. Водоцементное отношение принято равным 0.7. Гидратация проходила в течение 2 ч при принудительном перемешивании смеси.

Влияние добавки на физико-механические характеристики оценивали на цементно-песчаных образцах 40 x 40 x 160 мм. Отношение цемента к песку принято 1:3. Добавка вводилась в воду затворения в разных количествах. Количество сухих веществ в добавке составляло 0; 2.5; 5 и 7.5 % от массы вяжущего (цемента). Водоцементное отношение с учетом воды, содержащейся в добавке, принято равным 0.5.

Распалубливание проводилось по истечении 1 сут. Испытания на растяжение при изгибе и на сжатие проводились по истечении 28 сут. Прочность образцов определяли в соответствии с ГОСТ 310.4-81.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При изучении влияния предварительно гидратированных цементных суспензий на свойства цементно-песчаных образцов установлено, что при введении таких суспензий в цементно-песчаный раствор изменяется плотность образцов, а следовательно, и их прочность. Результаты испытаний приведены в табл. 3. По данным этой таблицы видно, что с увеличением количества сухих веществ предварительно гидратированной добавки с 2.5 до 7.5 % от цемента увеличивается прочность и плотность образцов.

Повышение плотности образцов можно объяснить изменением фракционного состава инертного заполнителя за счет гидратированных зерен цемента. Предположительно эти зерна заполняют микропоры в структуре бетона, что приводит к уплотнению бетона в целом. С повышением плотности материала растет и его прочность. Кроме того, явление роста прочности можно объяснить тем, что гидратированные зерна цемента выступают в роли кристаллических затравок, ускоряющих процессы гидратации частиц цемента, что приводит к набору прочности.

По сравнению с контрольным образцом наибольшее снижение плотности и прочности наблюдалось при использовании 2.5 % добавки, при этом прочность на сжатие снизилась на 6 %, а на растяжение при изгибе – на 8 %. Потерю прочности образца можно объяснить большой рассеянностью гидратированных частиц – кристаллических затравок, в результате которой образуется неоднородная структура с пониженной прочностью.

Рост прочности на сжатие, по сравнению с контрольным образцом, наблюдался при использовании 7.5 % добавки (на 11 %), при этом имело место незначительное увеличение плотности образца.

Таблица 3. Влияние предварительно гидратированной цементной добавки на свойства цементно-песчаных образцов

Состав	Количество сухих веществ добавки от массы цемента, %	Средняя плотность образцов, кг/м ³	Прочность образцов, МПа
1	0.0	2 257	$\frac{33.5}{6.2}$
2	2.5	2 252	$\frac{31.5}{5.7}$
3	5.0	2 251	$\frac{32.6}{6.0}$
4	7.5	2 271	$\frac{37.1}{6.0}$

Примечание. В числителе приведено среднее значение показателя прочности на сжатие, в знаменателе – на растяжение при изгибе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования возможности использования цементной суспензии для изготовления товарного бетона необходимы для создания полноценной технологии рециклинга бетонных смесей.

На текущем этапе исследования установлено, что при добавлении в смесь предварительно гидратированных частиц в количестве 2.5 % происходит снижение физико-механических характеристик получаемых образцов. Увеличение количества добавки до 7.5 % приводит к повышению прочности на сжатие на 11 % и незначительному увеличению плотности.

Для подтверждения выдвинутых гипотез необходимы проведение дополнительных исследований микроструктуры, установление зависимостей ранней прочности цементных образцов от количества добавки из предварительно гидратированного цемента и расширение диапазона ее варьирования.

Библиографический список

1. Остроух, А.В. Система рециклинга товарного бетона / А.В. Остроух, Н.Е. Суркова // Лучшая научная статья 2017: сборник статей XII Международного научно-практического конкурса / под общ. ред. Г.Ю. Гуляева. Пенза: Наука и Просвещение, 2017. С. 21–25.

2. Касторных, Л.И. О безотходной технологии производства бетонных смесей / Л.И. Касторных, Т.В. Пак // Строительство – 2015: материалы международной научно-практической конференции. Ростов н/Д: РГСУ, 2015. С. 568–570.

3. Пат. Российская Федерация, МПК В28С 5/00, В28С 9/02. Способ получения бетонной смеси с утилизацией ранее полученных остатков этой смеси / Коган А.С. № 2017140662; заявл. 22.11.2017.

УДК 691.533

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ НА СВОЙСТВА ГИПСОИЗВЕСТКОВЫХ КОМПОЗИТОВ

М.Ю. Завадько, В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новицкова

ВВЕДЕНИЕ

Парниковый эффект – одна из глобальных проблем современного мира. К сожалению, появление сегодня технологий неизбежно способствует его образованию [1, 2]. Выбросы в атмосферу углекислого газа в процессе производства многих обжиговых строительных материалов достигают внушительных объемов. Например, цементная промышленность способствует выбросу в атмосферу в среднем 5% CO₂ от общего объема техногенных выбросов. Готовых технологических решений, направленных на снижение концентрации углекислого газа в выбросах от цементных печей, на данный момент не существует. Однако эту проблему можно разрешить посредством использования альтернативных видов вяжущего [3]. Многие бесцементные виды вяжущих не только безопасны с точки зрения технологии, но способны даже твердеть, поглощая атмосферный CO₂. Например, гипсовое сырье безопасно на всех производственных циклах. Производство гипсового вяжущего не требует высоких температур, соответственно, не является энерго- и ресурсозатратным. Материалы из гипса безопасны с точки зрения экологии, а также представляют большой интерес с точки зрения архитектурных и интерьерных возможностей: гипсовый камень обладает природной белизной, что, несомненно, делает его более выразительным в эстетическом плане.

Известковое вяжущее также является экологически чистым продуктом и может служить альтернативой портландцементу. Известь в отличие от гипсового вяжущего обладает еще одним преимуществом – водостойкостью. Водостойкость и прочность известь приобретает во время процесса поглощения углекислого газа – карбонизации.

Учитывая вышесказанное, гипсоизвестковые композиты можно отнести к биопозитивным: все компоненты безопасны, как и процессы их получения. В процессе эксплуатации такие композиты способствуют улучшению микроклимата посредством регулирования влажности, а также поглощения углекислого газа, тем самым благотворно влияя на здоровье человека. Поэтому в статье была исследована возможность получения

эффективного гипсового композита с известью в качестве добавки с дальнейшим твердением в среде углекислого газа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходными материалами в исследованиях были приняты высокопрочный гипс марки ГВВС-16 Самарского гипсового комбината, отход производства базальтовых волокон (Тверская обл.), молотая известь Угловского известкового комбината (Новгородская обл.). Оптимальное водотвердое отношение составило 0.36.

Характеристики композитов различного состава были получены на 7-е сут твердения в воздушно-сухих условиях и на 7, 14, 28-е во влажных. Образцы с содержанием извести выдерживались в среде углекислого газа в течение 6 сут при температуре 20 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты испытаний образцов, выдержанных в воздушно-сухих условиях представлены на рис. 1, 2.

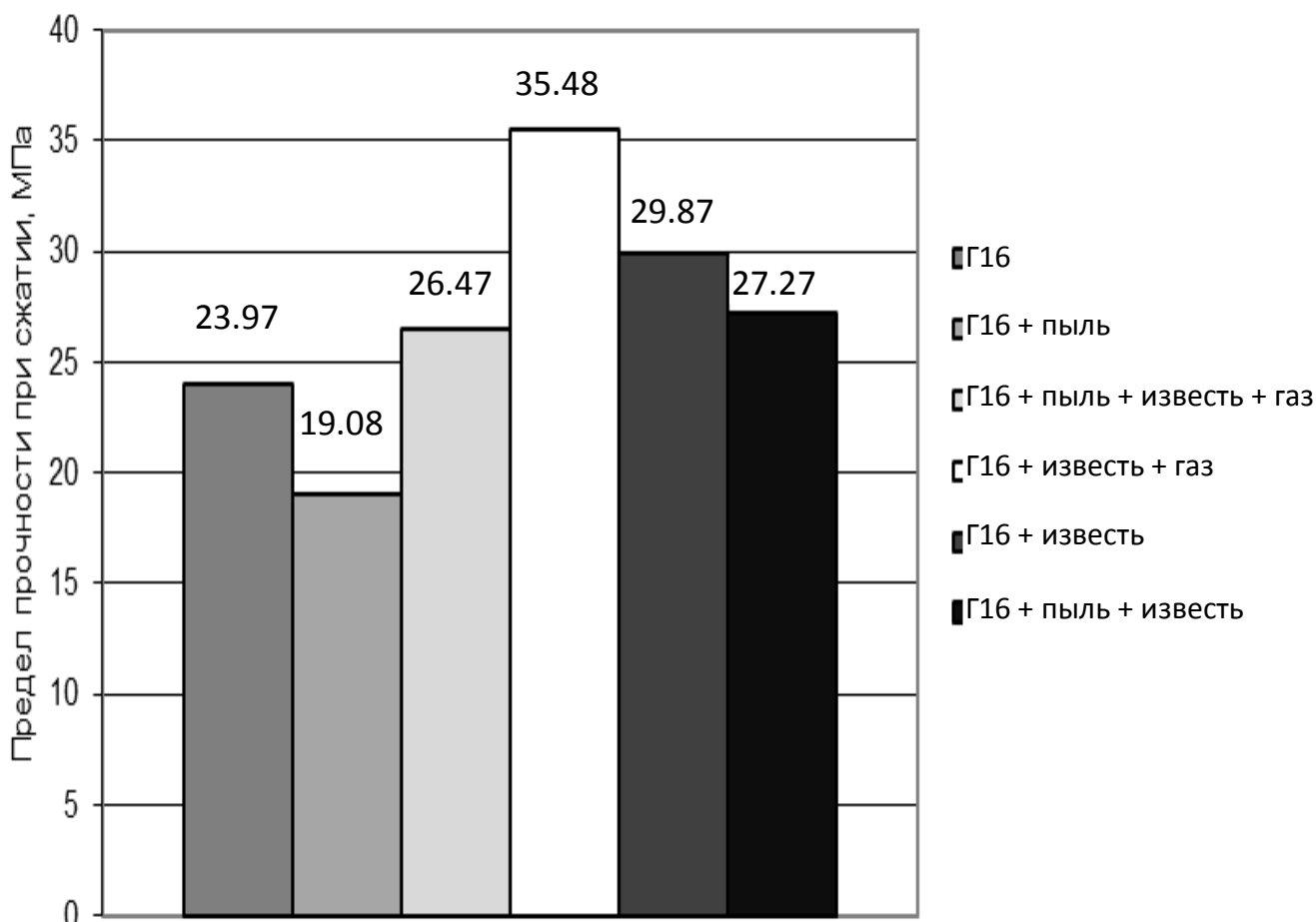


Рис. 1. Прочность на сжатие образцов (сухие условия)

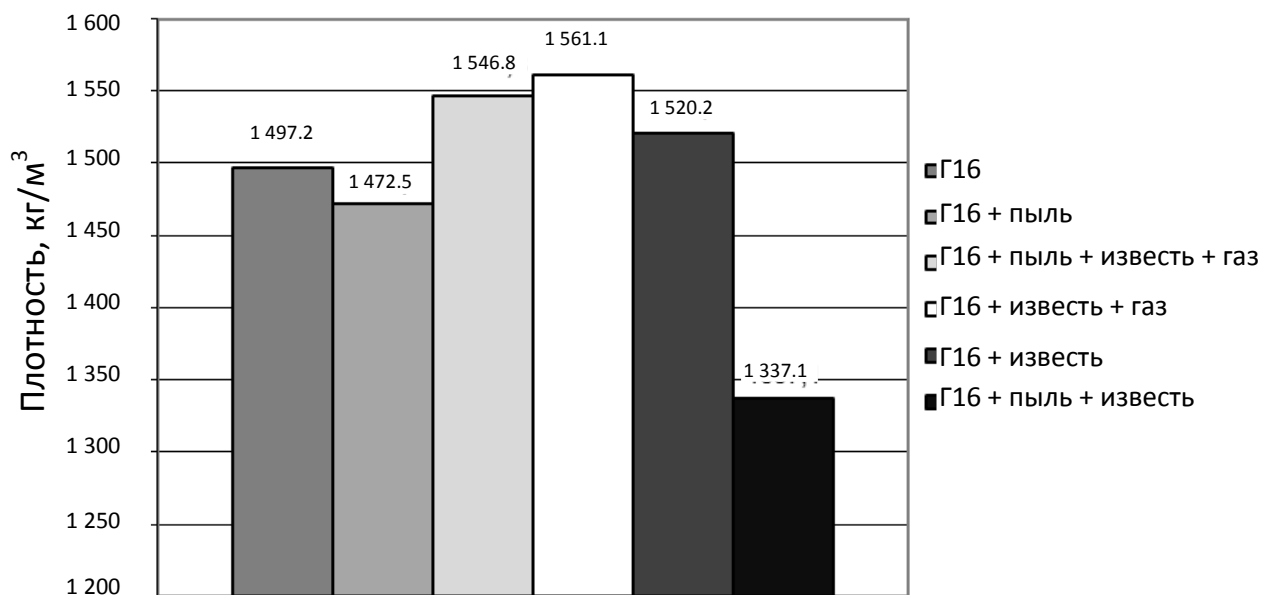


Рис. 2. Плотность образцов (сухие условия)

Наибольшую прочность на сжатие и плотность в сухих условиях показали образцы, содержащие в составе известь и выдержанные в среде углекислого газа в течение 7 сут.

Образцы состава, показавшего наибольшую прочность, затем были испытаны во влажных условиях; результаты данных испытаний приведены на рис. 3–5.

В результате исследований выявлено: максимальная прочность на сжатие образцов, выдержанных в воздушно-сухих условиях, в возрасте 7 сут составляет 35,48 МПа (образцы с известью, прошедшие карбонизацию), аналогично во влажных (12,34 МПа). Максимальная прочность на сжатие при выдерживании во влажных условиях на 28-е сут составила 34,95 МПа, соответствующая плотность – 1 587,5 кг/м³.

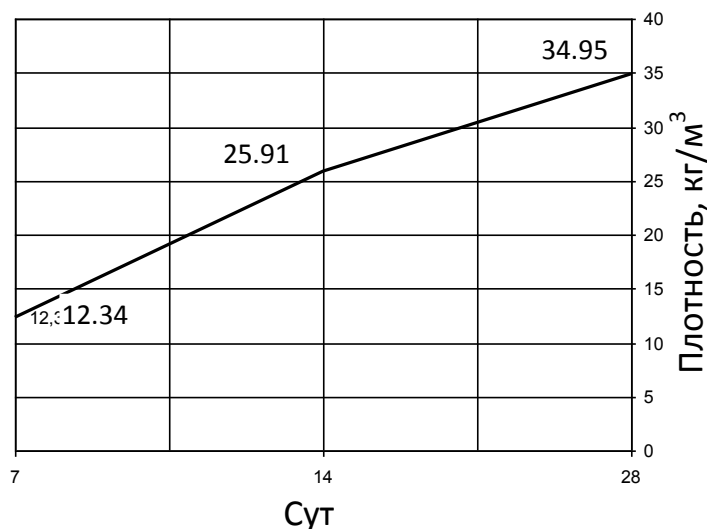


Рис. 3. Прочность на сжатие и плотность образцов (влажные условия)

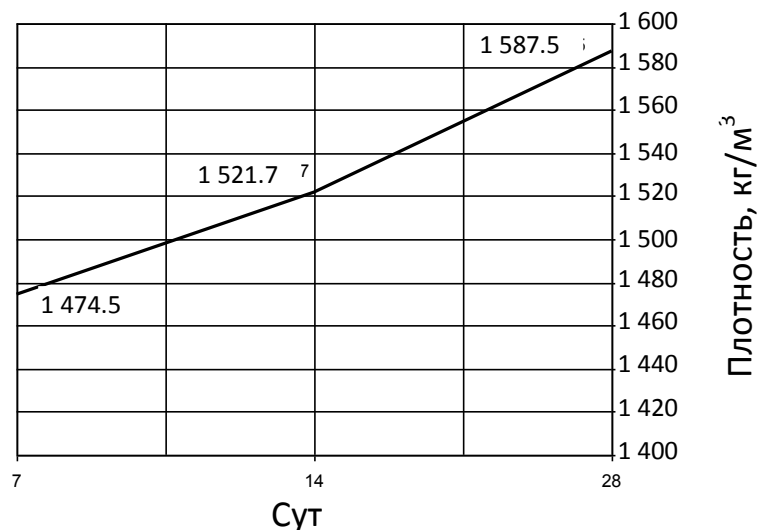


Рис. 4. Плотность образцов (влажные условия)

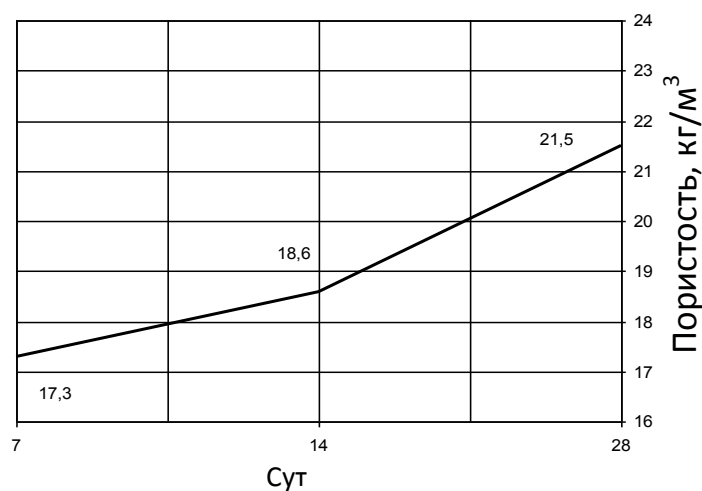


Рис. 5. Пористость образцов (влажные условия)

Проведенные исследования подтверждают возможность получения упрочненной структуры гипсового камня. Установлено, что углекислый газ способствует росту прочности гипсового камня посредством уплотнения его структуры.

Библиографический список

1. Лашина, В.В. Загрязнение атмосферы при производстве цемента и опыт по снижению выбросов углекислого газа на предприятиях цементной промышленности Германии и России / В.В. Лашина, А.И. Петрова, И.В. Петров // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2011. № 12. С. 26–33.

2. Кондратьев, В.В. Переработка и применение мелкодисперсных отходов кремниевого производства в строительстве / В.В. Кондратьев [и др.] // Олон улсын бетоны XIV Бага хурал: материалы Международного строительного симпозиума. Улан-Батор, 2015. С. 105–114.

3. Петропавловская, В.Б. Использование отходов природного гипсового камня в производстве безобжиговых материалов / В.Б. Петропавловская [и др.] // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 28–31.

УДК 691.328.34:004.925.83

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ С КОНСТРУКЦИОННЫМ ПЕНОБЕТОНОМ

К.С. Котова

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в монолитном малоэтажном домостроении из неавтоклавного пенобетона возводят несущие и самонесущие стены, перегородки. Но эффективность пенобетона в полной мере реализуется при возведении всех видов конструктивных элементов [1]. Поэтому необходимо оценить возможность использования пенобетона в качестве материала для всех конструктивных элементов, в том числе изгибаемых. При этом прочность сцепления арматуры с пенобетоном рассматривается как главное условие надежной работы конструктивного элемента. Однако структура пенобетона создает неоднородный контактный слой с поверхностью арматуры, что, как следствие, будет отражаться на особенностях совместной работы пенобетона и арматуры в конструкциях; имеется также опасность коррозии арматуры. Подчеркнем, что металлическая арматура может использовать лишь часть своего конструкционного потенциала из-за пониженных прочностных свойств и повышенной деформативности пенобетона. Применение коррозионно-стойкой и более деформативной стеклокомпозитной или базальтной композитной арматуры может обеспечить лучший вариант совместной работы в конструкциях и исключить опасность коррозии арматуры.

Статья посвящена результатам компьютерного моделирования совместной работы в изгибаемых элементах металлической, стеклокомпозитной и базальтной композитной арматуры с пенобетонами средней плотности (1 200–1 600 кг/м³) и оценкой влияния на их сцепление механических свойств пенобетона и арматуры. В качестве схемы для компьютерного моделирования процесса сцепления был принят балочный метод, описанный в ГОСТ 31938-2012 [2]. При реализации данного метода в качестве параметра, характеризующего совместную работу пенобетона и арматуры, принимается величина смещения арматуры относительно бетона – проскальзывание, обозначаемое как Δ .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Используемые материалы

Для определения прочности сцепления в системе «пенобетон – арматура» в качестве варьируемых факторов выступили:

1) вид арматуры: базальтная композитная, стеклокомпозитная и металлическая, которая выступила в качестве базы для сравнения. Все виды арматуры применялись одного диаметра (10 мм);

2) средняя плотность пенобетона (варьировалась в пределах 1 200–1 600 кг/м³).

Физико-механические характеристики пенобетона приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-механические характеристики пенобетона [3]

Показатели свойств	Марка пенобетона по средней плотности		
	D1600	D1400	D1200
Прочность при сжатии, МПа	15	8	4
Прочность при растяжении, МПа	3.3	2.2	1.3
Модуль упругости, МПа	18 000	10 000	5 100

Характеристика используемых в эксперименте арматурных изделий и параметры их заделки представлены в табл. 2. Количество образцов-моделей для каждой плотности в серии – 3 штуки.

Таблица 2. Характеристика используемых арматурных изделий и параметры их заделки в образцы-балки пенобетона

Вид арматуры	Завод-изготовитель	Номинальный Диаметр d, мм	Модуль упругости, МПа	Предел прочности при растяжении σ_b , МПа	Предел текучести σ_t , Н/мм ²	Значения расчетного сопротивления сжатию, МПа	Относительное удлинение, %	Фактический диаметр стержня, мм	Длина заделки, мм	Длина стержня, мм
Стеклокомпозитная	Воронежский завод композитных материалов	10	50 000	800	Нет	300	2.2	9.5–11.0	205	1 250
Базальтная композитная	Ярославский завод композитных материалов	10	50 000	800	Нет	300	2.2	9.5–10.0	195	
Металлическая профильная А500	ООО «Металл-инвест Плюс»	10	200 000	600 (врем. сопротив.)	500	350	Не менее 14	10.5–11.0	215	

Компьютерное моделирование сцепления арматуры с пенобетоном

Численное моделирование реализовано с помощью программного комплекса с использованием при построении модели метода конечных элементов. Расчетная схема (рис. 1) принята в виде однопролетной балки прямоугольного сечения. Схема приложения нагрузок показана на рис. 1.

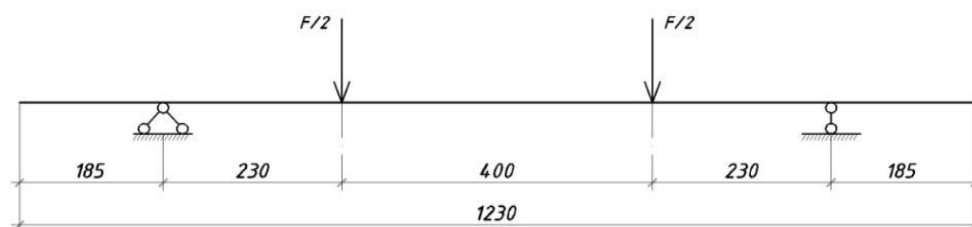


Рис. 1. Расчетная схема исследуемых балок

Смоделированный бетонный армированный элемент состоит из стандартных конечных элементов. Контакт арматуры с бетоном, согласно ГОСТ 31938-2012 [2], происходит по центру балок длиной 10 диаметров стержня. Связь арматуры с бетоном на необходимом участке обеспечивалась за счет объединения перемещений. В сжатой зоне между балками смоделирован виртуальный шарнир посредством объединения перемещений. Остальная часть арматуры в теле бетона защищена от адгезии поливинилхлоридным вкладышем, соответственно, данные участки в совместную работу не были включены. На рис. 2 показано, как проходит работа компьютерной модели.

Задаваемыми значениями являлись факторы, влияющие на сцепление арматуры с бетоном: условия нагружения, геометрия арматуры, физико-механические свойства материалов. Прочностные и деформативные характеристики конечных элементов заданы в двух вариантах: основываясь на значениях, полученных экспериментально, и данных, взятых из нормативных документов.

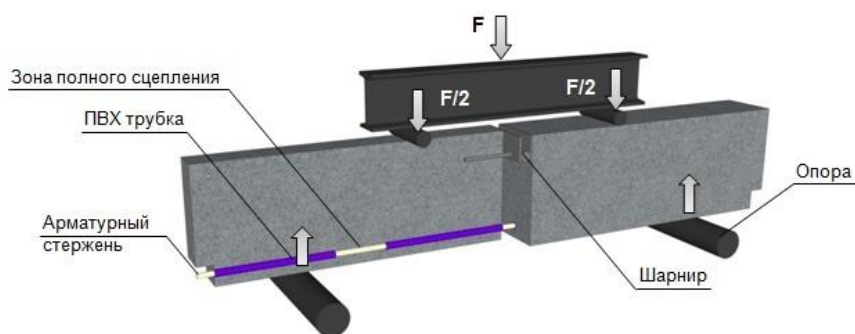


Рис. 2. Визуализация работы компьютерной модели

Нагрузка на элемент задавалась пошагово с интервалом в 15 кН. На каждом этапе нагружения определялась величина продергивания арматурного стержня в миллиметрах.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Совместная работа арматуры с пенобетоном оценивалась на основе численной модели совместной работы арматуры и пенобетона. Для каждой модели были построены два вида диаграмм зависимости «проскальзывание – нагрузка» для каждой плотности пенобетона согласно вариантам задаваемых значений его механических характеристик. Результаты моделирования анализировались для каждой плотности пенобетона как взаимосвязь величины проскальзывания арматурного стержня и значения прикладываемой нагрузки.

Для моделей балок из пенобетона средней плотности $1\,200\text{ кг/м}^3$ величина проскальзывания арматуры всех видов зависит от варианта задаваемых значений механических характеристик пенобетона и варьируется в диапазоне 10–12 %. Для моделей с характеристиками, определенными экспериментально, полученная расчетная величина проскальзывания имеет более низкие значения (рис. 3а) по сравнению с вариантом, где вводятся данные из нормативных документов (рис. 3б).

Компьютерные модели из пенобетона плотностью $1\,400\text{ кг/м}^3$ также показали разницу в полученных результатах. Для варианта, где при моделировании используются полученные экспериментально характеристики пенобетона, зафиксированы значения проскальзывания на 27–29 % меньшие по сравнению с вариантом использования в расчетах нормативных значений (рис. 3в). Наибольшая разница в результатах расчетов характерна для металлической арматуры.

Результаты расчетов для моделей балок из пенобетона плотностью $1\,600\text{ кг/м}^3$ разнятся в пределах 40–42 %. Наименьшими расчетными величинами проскальзывания стержней обладает вариант при применении экспериментальных характеристик пенобетона (рис. 3д), наибольшими – вариант с использованием характеристик из нормативных документов (рис. 3е).

Анализируя полученные в результате компьютерного моделирования расчетные значения величины проскальзывания, можно сделать вывод, что разница между значениями проскальзывания арматуры зависит от варианта задаваемых механических характеристик пенобетона и возрастает с увеличением средней плотности пенобетона. Полученная закономерность одинаково справедлива для всех рассмотренных видов арматуры. Во всех случаях значения проскальзывания стержней меньше для варианта моделирования с использованием экспериментально уточненных характеристик пенобетона. Для каждой плотности наибольшая разница в расчетных величинах фиксируется для образцов-моделей с металлической арматурой, наименьшая – со стеклокомпозитной.

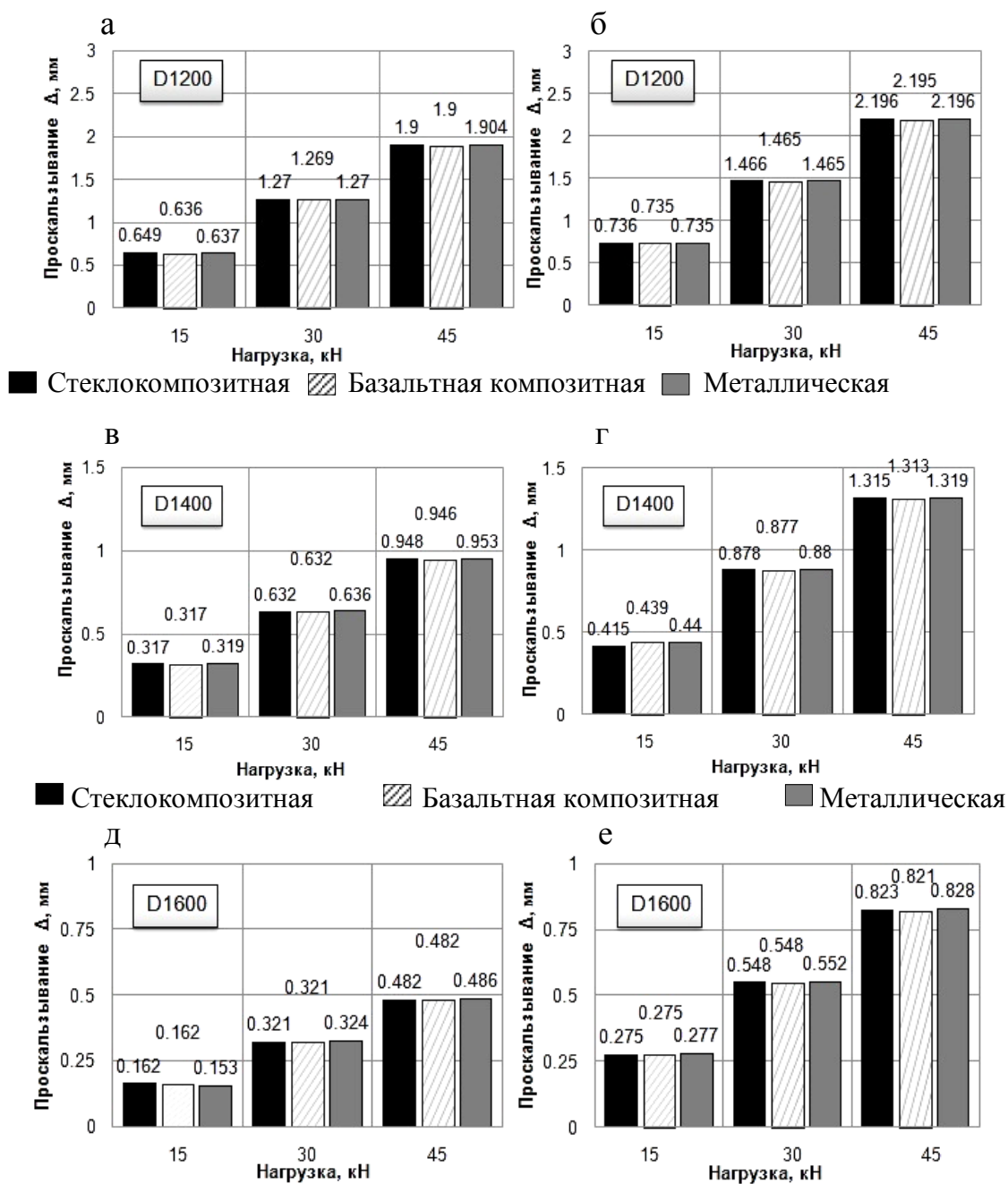


Рис. 3. Диаграммы зависимости «проскальзывание – нагрузка» с использованием при расчете: а, в, д – экспериментальных данных; б, г, е – данных нормативных документов

ВЫВОД

Полученная разница в значениях величины проскальзывания арматуры в балочных элементах из пенобетона, определенная при компьютерном моделировании совместной работы различных видов арматуры и конструкционного пенобетона, является существенной. С целью выявления корректности работы компьютерной модели требуется ее верификация, что предопределило задачи дальнейшего исследования:

1) проведение экспериментальных исследований по определению сцепления арматуры с пенобетоном балочным методом для верификации результатов компьютерного моделирования;

2) выявление возможности применения различных видов арматуры в изгибаемых элементах из конструкционного пенобетона задаваемой средней плотности;

3) разработка предложений к уточнению значений параметров сцепления и физико-механических характеристик пенобетона для применения в расчетах конструкций.

Библиографический список

1. Славчева, Г.С. Повышение эффективности применения неавтоклавных ячеистых бетонов (пенобетонов) в строительстве / Г.С. Славчева, К.С. Котова // Жилищное строительство. 2015. № 8. С. 44–47.

2. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. М.: Стандартинформ, 2014. 35 с.

3. Новиков, М.В. Механические свойства цементного поризованного бетона при одноосном сжатии с учетом закономерностей его ползучести / М.В. Новиков, Е.М. Чернышов, Г.С. Славчева // Строительные материалы. 2016. № 11. С. 26–31.

УДК 699.81

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОГНЕСТОЙКОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А.В. Крутских, А.В. Бровкин, С.А. Соколов, С.В. Черемных

Вопросы, связанные с определением огнестойкости здания в целом и его отдельных конструкций в частности, должны быть решены на стадии проектной документации, проходящей экспертизу. В разделе «Конструктивные и объемно-планировочные решения» должно быть произведено, согласно [1], обоснование проектных решений и мероприятий, обеспечивающих пожарную безопасность. Кроме того, в раздел 9 «Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности» должно быть включено описание и обоснование принятых конструктивных и объемно-планировочных решений, степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности строительных конструкций [2].

Значительный вклад в разработку моделей и методов оценки огнестойкости строительных конструкций, а также в автоматизацию процесса проектирования внесли такие отечественные ученые, как В.М. Ройтман, А.И. Яковлев, А.Г. Тамразян, Л.А. Аветисян, В.С. Федо-

ров, В.Е. Левицкий, И.А. Соловьев, В.В. Белов, Н.В. Гогоберидзе, Н.В. Благородова и другие исследователи, а также зарубежные ученые (A.P. Mouritz, A.G. Gibson, Yaqiang Jiang), коллектив авторов J. Outinen, ZhengWei и др.

При проектировании любой строительной конструкции обязательно возникает вопрос о ее сопротивляемости опасным факторам пожара, в первую очередь температурному воздействию. Вопросы огнестойкости строительных конструкций могут быть решены как экспериментальными, так и расчетными методами.

Определение предела огнестойкости расчетным методом имеет существенное преимущество перед экспериментальным, так как нет необходимости проводить сложные и дорогостоящие испытания конструкций при огневом воздействии.

В общем случае при установлении пределов огнестойкости строительных конструкций необходимо выполнить расчет, который состоит из двух частей: теплотехнической и статической задачи.

Теплотехническая часть общей задачи по оценке предела огнестойкости сводится к определению температур в сечениях рассматриваемой строительной конструкции в ходе воздействия на нее стандартного температурного режима. Для решения поставленной задачи используются уравнения нестационарной теплопроводности твердого тела с учетом изменения теплофизических характеристик строительных материалов с ростом температуры. Прежде всего данная задача важна для оценки теплоизолирующей способности ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Статическая задача сводится к расчету несущей способности конструкций при воздействии пожарной нагрузки. Эта задача решается с помощью уравнений предельного равновесия и деформаций с учетом изменения физико-механических характеристик строительных материалов в зависимости от температуры, определенной теплотехническим расчетом.

В данный момент на рынке программных средств существует большое разнообразие программ, позволяющих решать как одну из этих задач, так и теплотехническую и статическую задачи совместно, что является наиболее удобным.

Можно рассмотреть, каким образом в укрупненном виде решается совместно теплотехническая и статическая задачи или каждая по отдельности в программно-вычислительных комплексах. Примем:

что **программа (А)** предназначена для решения теплотехнической и статической задач расчета огнестойкости в едином автоматизированном алгоритме;

программа (В) позволяет решать статическую задачу (установить несущей способности с учетом воздействия пожара) огнестойкости;

программа (С) дает возможность решать теплотехническую задачу (определить распределения температуры по сечению конструкции) огнестойкости.

Тогда расчет огнестойкости конструкции можно отобразить в виде рисунка.

Как видно из рисунка, только программа А способна решить задачу расчета огнестойкости полностью, включая теплотехническую и статическую части, оставшиеся программы В и С способны справиться только с одним из этапов, поэтому могут быть применены последовательно для получения полных и достоверных данных при расчете огнестойкости.

Перспективным направлением развития программных средств при решении задачи огнестойкости строительных конструкций является такое программное средство, которое позволяло бы решать и проводить экспресс-анализ на каждом этапе проектирования, отличалось бы простотой задания исходных данных, достаточной адаптивностью, что позволило бы использовать его при изменениях нормативной базы, появлении новых строительных материалов. В то же время результаты расчета программы представлялись бы с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделаем выводы, следующие из данных, приведенных в статье:

для решения задачи огнестойкости наиболее часто применяются расчетные методы, которые являются менее трудозатратными при их проведении и наиболее дешевыми по сравнению с экспериментальными методами оценки сопротивляемости конструкций пожарным нагрузкам;

при применении расчетных методов оценки огнестойкости строительных конструкций целесообразно применение систем автоматизированного проектирования;

задача оценки огнестойкости можно разделить на две задачи: теплотехническую и статическую;

существуют программные средства, позволяющие решать как совместно каждую из задач по определению огнестойкости строительных конструкций, так и по отдельности;

наиболее перспективными программными средствами являются такие, которые позволяли бы в одном программном комплексе полностью решать задачу огнестойкости, быть достаточно простыми для освоения пользователями и иметь точность, достаточную для инженерных расчетов.



Диаграмма укрупненного алгоритма решения задачи огнестойкости строительных конструкций

Библиографический список

1. Постановление Правительства РФ от февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию».
2. Федеральный закон Российской Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

УДК 539.3:620.193:669

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

В.О. Кузнецова

ВВЕДЕНИЕ

Агрессивные водородосодержащие среды приводят к значительному ухудшению механических характеристик конструктивных элементов и сокращению сроков их эксплуатации. Пологие сферические оболочки являются распространенными конструкционными элементами, работающими в этих условиях. Это, например, основные элементы летательных аппаратов в авиа- и ракетостроении. В металлургической промышленности, нефтеперерабатывающей, химической и металлургической отраслях, как правило, основной агрессивной средой оказывается водородосодержащая [1,2].

Потенциал деформаций W для материалов с наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния строим аналогично уравнениям деформационной теории пластичности для материалов с изначальной разносопротивляемостью. В итоге представим его в виде суммы квазилинейной и нелинейной частей, зависящих от степени водородонасыщения:

$$W_1^*(\lambda) = [A_1(\lambda) + B_1(\lambda)\alpha_1]\sigma_1^2 + [A_1(\lambda) + B_1(\lambda)\alpha_2]\sigma_2^2 + [A_1(\lambda) + B_1(\lambda)\alpha_3]\sigma_3^2 + \\ + [C_1(\lambda) + D_1(\lambda)(\alpha_2 + \alpha_3)]\sigma_2\sigma_3 + [C_1(\lambda) + D_1(\lambda)(\alpha_1 + \alpha_2)]\sigma_1\sigma_2 + [C_1(\lambda) + \\ + D_1(\lambda)(\alpha_1 + \alpha_3)]\sigma_1\sigma_3 + \{ [A_2(\lambda) + B_2(\lambda)\alpha_1]\sigma_1^2 + [A_2(\lambda) + B_2(\lambda)\alpha_2]\sigma_2^2 + \\ + [C_2(\lambda) + D_2(\lambda)(\alpha_1 + \alpha_2)]\sigma_1\sigma_2 + [C_2(\lambda) + D_2(\lambda)(\alpha_1 + \alpha_3)]\sigma_1\sigma_3 \}^n,$$

где $A_1(\lambda)$, $B_1(\lambda)$, $C_1(\lambda)$, $D_1(\lambda)$ – материальные функции квазилинейной части; $A_2(\lambda)$, $B_2(\lambda)$, $C_2(\lambda)$, $D_2(\lambda)$ – материальные функции нелинейной части, изменяющиеся в зависимости от степени насыщения материала агрессивной средой; λ – концентрация агрессивной среды в конструкционном материале [3].

При использовании нормированного пространства № 2 как более предпочтительного потенциал деформаций с учетом изменения

механических характеристик материала под воздействием агрессивной среды (λ) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 W_1(\lambda) &= [A_e(\lambda) + B_e(\lambda)\xi]\sigma^2 + [C_e(\lambda) + D_e(\lambda)\xi + E_e(\lambda)\eta\cos 3\varphi]\tau^2 + \\
 &+ \{[A_p(\lambda) + B_p(\lambda)\xi]\sigma^2 + [C_p(\lambda) + D_p(\lambda)\xi + E_p(\lambda)\eta\cos 3\varphi]\tau^2\}^n; \\
 A_e(\lambda) &= 3[A_1(\lambda) + C_1(\lambda)]; B_e(\lambda) = \sqrt{3}[B_1(\lambda) + 2D_1(\lambda)]; C_e(\lambda) = 3[A_1(\lambda) - C_1(\lambda)/2]; \\
 D_e(\lambda) &= \sqrt{27}B_1(\lambda); E_e(\lambda) = \sqrt{1,5}[B_1(\lambda) - D_1(\lambda)]; A_p(\lambda) = 3[A_2(\lambda) + C_2(\lambda)]; \\
 B_p(\lambda) &= \sqrt{3}[B_2(\lambda) + 2D_2(\lambda)]; C_p(\lambda) = 3[A_2(\lambda) - C_2(\lambda)/2]; D_p(\lambda) = \sqrt{27}B_2(\lambda); \\
 E_p(\lambda) &= \sqrt{1,5}[B_2(\lambda) - D_2(\lambda)],
 \end{aligned}$$

где n – показатель степени нелинейности материала с учетом изменения механических характеристик материала под воздействием агрессивной среды; $A_e(\lambda)$, $B_e(\lambda)$, $C_e(\lambda)$, $D_e(\lambda)$, $E_e(\lambda)$ и $A_p(\lambda)$, $B_p(\lambda)$, $C_p(\lambda)$, $D_p(\lambda)$, $E_p(\lambda)$ – функциональные зависимости механических характеристик материала, от степени концентрации водорода λ .

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассматривается упругое равновесие полой сферической оболочки толщиной h под действием поперечной осесимметричной равномерно-распределенной нагрузки q и водородосодержащей среды с концентрацией λ . Срединная поверхность оболочки характеризуется радиусом R , м. Оболочка имеет жесткое защемление по контуру.

Для сферической оболочки справедливо постоянство главных радиусов кривизны срединной поверхности оболочки в пределах ее плана: $R_1 = R_2 = R$. Тогда ее главные кривизны принимают значение $k_1 = k_2 = k = 1/R$. Оболочку принимаем достаточно тонкой. При этом используем традиционные гипотезы Кирхгофа – Лява:

- 1) нормаль к срединной поверхности после деформации остается перпендикулярной к этой поверхности в деформированном состоянии;
- 2) при определении параметров напряженного состояния влиянием нормальных напряжений σ_z можно пренебречь [1].

Кинематические соотношения рассматриваемой оболочки в рамках теории пологих оболочек примут вид:

- а) компоненты деформации в срединной поверхности

$$\varepsilon_r = u_{,r} - kw + 0,5\theta_\varphi^2; \varepsilon_\varphi = \frac{u}{r} - kw, \quad (1)$$

где $\varepsilon_r, \varepsilon_\varphi$ – относительные деформации в срединных поверхностях; u, w – радиальные перемещения и прогибы; k – главная кривизна; $\theta_\varphi = -w_{,r}$ – поворот нормали к срединной поверхности; r – радиальная координата;

б) компоненты изгибной деформации (кривизны)

$$\chi_r = -w_{,rr}; \chi_\phi = -\frac{w_{,r}}{r};$$

в) компоненты тензора деформаций через параметры деформации $\varepsilon_r, \varepsilon_\phi$ и кривизны χ_r, χ_ϕ срединной поверхности

$$e_r = \varepsilon_r + z\chi_r; e_\phi = \varepsilon_\phi + z\chi_\phi, \quad (3)$$

где z – вертикальная координата, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки.

Подставляя (1) в (2), получаем компоненты тензора деформаций через перемещения и прогибы:

$$e_r = u_{,r} - kw + 0,5w_{,r}^2 - zw_{,rr}; e_\phi = \frac{u}{r} - kw - z\frac{w_{,r}}{r}.$$

Усилия и моменты найдем через напряжения следующим образом:

$$N_r = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r dz; N_\phi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\phi dz;$$

$$M_r = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_r z dz; M_\phi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\phi z dz.$$

Моменты и усилия запишем в следующем виде:

$$M_r = K_{11}\varepsilon_r + K_{12}\varepsilon_\phi + D_{11}\chi_r + D_{12}\chi_\phi;$$

$$M_\theta = K_{21}\varepsilon_r + K_{22}\varepsilon_\phi + D_{21}\chi_r + D_{22}\chi_\phi;$$

$$N_r = C_{11}\varepsilon_r + C_{12}\varepsilon_\phi + K_{11}\chi_r + K_{12}\chi_\phi ;$$

$$N_\theta = C_{21}\varepsilon_r + C_{22}\varepsilon_\phi + K_{21}\chi_r + K_{22}\chi_\phi ,$$

$$\text{где } C_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) dz; K_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z dz; D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} B_{ij}(\lambda) z^2 dz.$$

Приведем внутренние усилия и моменты к срединной поверхности $z = 0$; при условии $zk \ll 1$ уравнения равновесия принимают вид:

$$M_{r,rr} - M_{\phi,r}/r + 2M_{r,r}/r + k(N_r + N_\phi) + N_r w_{,rr} = -q;$$

$$N_{r,r} + (N_r - N_\phi)/r - k[M_{r,r} + (M_r - M_\phi)/r] = 0.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Важно учесть степень насыщения среды водородом во времени.

Следуя двухшаговому методу последовательного возмущения параметров В.В. Петрова, запишем выражения для приращений деформаций срединной поверхности:

$$\delta\varepsilon_r = \delta u_{,r} - k\delta w + w_{,r} \delta w_{,r}; \delta\varepsilon_\phi = \frac{\delta u}{r} - k\delta w. \quad (3)$$

Приращения кривизны срединной поверхности запишем в виде:

$$\delta\chi_r = -\delta w_{,rr}; \delta\chi_\phi = -\frac{\delta w_{,r}}{r}. \quad (4)$$

Запишем приращения деформаций через приращения деформаций срединной поверхности $\delta\varepsilon_r$, $\delta\varepsilon_\phi$ и кривизн срединной поверхности $\delta\chi_r$ и $\delta\chi_\phi$ с учетом изменения концентрации водорода во времени:

$$\delta e_r = \delta\varepsilon_r + z\delta\chi_r + \delta\lambda; \delta e_\phi = \delta\varepsilon_\phi + z\delta\chi_\phi + \delta\lambda. \quad (5)$$

Используя формулы (3)–(5), получаем выражения, связывающие приращения деформаций и перемещений с учетом изменения концентрации водорода во времени:

$$\delta e_r = \delta u_{,r} - k\delta w + w_{,r} \delta w_{,r} - z\delta w_{,rr} + \delta\lambda; \delta e_\phi = \frac{\delta u}{r} - k\delta w - z\frac{\delta w_{,r}}{r} + \delta\lambda.$$

Количество вещества, которое диффундирует в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярную потоку вещества, или иначе плотность потока J , пропорциональна пространственному градиенту концентрации λ . Для небольших перепадов концентрации допускаем так называемый первый закон Фика, согласно которому количество вещества, проходящее через воображаемое сечение, перпендикулярное направлению диффузии, пропорционально величине градиента концентрации в этом сечении, площади сечения и времени диффузии:

$$J = -D \text{grad} \lambda = -D \frac{\delta\lambda}{\delta z},$$

где D – коэффициент диффузии.

При решении одномерной задачи уравнение переходит в первый закон Фика, который запишем в виде

$$J = -D\delta\lambda_{,z},$$

где z – координата в направлении диффузии.

Исходя из того, что коэффициент диффузии не зависит от концентрации водорода, из первого закона Фика следует второй:

$$\frac{(\delta\lambda)}{\delta t} = D \frac{\delta^2 \lambda}{\delta z^2},$$

где t – текущее время.

Ввиду одномерности задачи по диффузии уравнение соответствует второму закону Фика. Таким образом, решение строим по двойным преобразованиям Фурье (прямым и обратным):

$$\lambda(r, t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\psi_k(\gamma_k, r/R_2)}{\Psi_k} K_0 \exp(-\gamma_k^2 \frac{Dt}{R_2^2}),$$

где функция $\psi_k(\gamma_k, r/R_2)$ зависит от направления воздействия водорода.

При действии водорода изнутри оболочки получим

$$\psi_k(\gamma_k, r/R_2) = Y_0(\gamma_k R_1/R_2) J_0(\gamma_k r/R_2) - J_0(\gamma_k R_1/R_2) Y_0(\gamma_k r/R_2). \quad (6)$$

Для решения уравнения (6) в процессе односторонней и двухсторонней диффузии принимаем известные аналитические решения, представленные в работе [4].

Для процесса односторонней диффузии решение имеет вид

$$\lambda(z, t) = \lambda_1 + (\lambda_2 - \lambda_1)z/h + (2/\pi) \sum_{i=1}^{\infty} \sin(i \cdot \pi \cdot z/h) \exp(-F_0 \pi^2 i^2) \times \\ \times [\lambda_2 \cos(i \cdot \pi) - \lambda_1] / i,$$

где $F_0 = Dt/h^2$ – число Фурье; i – число членов ряда; λ_1 и λ_2 – краевые условия; h – толщина оболочки; z – координата точки по толщине оболочки.

Краевые условия представлены следующим образом: при воздействии среды со стороны действия поперечной силовой нагрузки

$$\lambda(-h/2, t) = \lambda_{\infty} = \lambda_1; \lambda(+h/2, t) = 0 = \lambda_2,$$

здесь λ_{∞} – равновесная концентрация водородосодержащей среды.

Начальные условия имеют вид

$$\lambda(z, 0) = 0.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большинство известных методик расчета для материалов с приобретенной разнсопротивляемостью имеют ряд недостатков, таких как накладываемые ограничения на свойства материалов и малая точность аппроксимации экспериментальных данных при сложных видах напряженного состояния.

Воздействие водородосодержащей среды в данной работе учитывается на основе нелинейных определяющих соотношений для изотропных разнсопротивляющихся сред, предложенных в работах А.А. Трещева [3, 4].

Библиографический список

1. Астафьев, В.И. Накопление поврежденности и коррозионное растрескивание металлов под напряжением / В.И. Астафьев, Л.К. Ширяева. Самара: СамГУ, 1998. 123 с.
2. Баландин, П.П. К вопросу о гипотезах прочности / П.П. Баландин // Вестник инженеров и техников. 1937. № 1. С. 37–41.
3. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения: монография / А.А. Трещев. М. – Тула: РААСН; ТулГУ, 2008. 264 с.
4. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной и наведенной чувствительностью к виду напряженно-деформированного состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещев. М. – Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. 326 с.

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
МОДИФИЦИРОВАННОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА**

Ю.Ю. Курятников, Р.С. Кочетков

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в строительстве находят все большее применение легкие бетоны, в частности керамзитобетон. Самонесущие стены из керамзитобетона средней плотностью от 1 500 до 1 800 кг/м³ во многих случаях являются оптимальным решением для жилищного строительства. В сравнении с тяжелыми бетонами средней плотностью 2 300–2 500 кг/м³, нагрузка на перекрытия и фундамент сокращается при улучшенных тепло- и звукоизоляционных свойствах [1]. Обычно применение легких бетонов из-за невысокой прочности ограничивается строительством самонесущих ограждающих конструкций. Однако сочетание низкой средней плотности, характерной для легких бетонов и высокой прочности, присущей тяжелым бетонам, позволяет значительно расширить область применения легких бетонов. Применение такого материала, с одной стороны, обеспечивает здания и сооружения требуемыми прочностными свойствами, а с другой – позволяет существенно экономить на общем весе. Такой материал эффективен при строительстве транспортных сооружений: мостов, путепроводов, эстакад и т. д. Для решения данной задачи перспективным представляется использование эффективных суперпластификаторов в сочетании с микронаполнителями и дисперсно-армирующими волокнами. Такие суперпластификаторы, как Melflux 5581 F, Melflux 2651F, позволяют значительно увеличить прочностные характеристики, ускорить набор прочности бетона, увеличить подвижность бетонной смеси до марки П4-П5 [2]. Среди суперпластификаторов серии Melflux наибольший интерес представляет Melflux 5581F, увеличивающий расплыв усеченного конуса до 180 мм, а аналог Melflux 2651F обеспечивает такую же текучесть смеси при более высоких концентрациях [3].

Большое влияние на прочностные характеристики оказывает дисперсное армирование. При введении фибры в бетон происходит структурирование цементно-минерального каркаса, а следовательно, и повышение прочностных характеристик. Введение полипропиленовой фибры повышает предел прочности при изгибе с 2,8 до 3,1 МПа, а предел прочности на сжатие – с 45,7 до 62,6 МПа. Это происходит за счет структурирования цементно-минерального каркаса [4]. При исследовании тяжелого бетона с базальтовой фиброй выявлено повышение прочности на растяжение при изгибе до 74 %, что в 3 раза больше по сравнению с

бетоном без микроармирования [5]. Армирование портландцементной матрицы как целлюлозным волокном, так и игольчатыми кристаллами этtringита приводит к упрочнению материала. При совместном введении этих компонентов материал имеет еще более высокие прочности на изгиб и сжатие [6].

При введении фибры в бетон в оптимальном количестве формируется внутренний каркас из волокон. При твердении цементно-песчаной матрицы возникают напряжения, которые воспринимаются фиброкаркасом и, соответственно, снижается относительная деформация композита. В работе [7] установлено, что максимальная величина усадки к концу исследуемого периода составила:

в составах без модифицированной базальтовой микрофибры (МБМ) – 0.147 %,

составах с содержанием МБМ 0.5 % – 0.115 %,

составах с содержанием МБМ 1 % – 0.072 %.

Таким образом, при прочих равных условиях введение микрофибры способствует снижению величины относительной деформации усадки на 51 % и уменьшает трещиностойкость. К такому же выводу пришли в работе [8].

В современных бетонах также важную роль играют микро-наполнители, которые повышают эксплуатационные свойства изделий. Кремнеземная пыль (КП), называемая также микрокремнеземом, представляет собой побочный продукт металлургического производства при выплавке ферросилиция и его сплавов, образующийся в результате восстановления углеродом кварца высокой чистоты в электропечах. Новые возможности использования КП тесно связаны с прогрессом в области создания эффективных суперпластификаторов (их сочетание дало толчок к созданию бетонов нового поколения, обладающих высокой прочностью (от 60 до 150 МПа), повышенной удобоукладываемостью и долговечностью [9, 10]).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Целью данной статьи является разработка математических моделей прочности керамзитобетона от факторов состава для использования его в монолитном строительстве.

В качестве материалов применились:

портландцемент ЦЕМ I 42,5Н;

кварцевый песок (модуль крупности – 2.4);

керамзитовый песок фракции 0–5 мм (модуль крупности – 3.4, марка по насыпной плотности – М500, марка по прочности – П100);

микрокремнезем;
гиперпластификатор Melflux 5581F;
базальтовое волокно длиной 1 см.

Для изготовления образцов применялась разработанная авторами методика: на первом этапе изготавливали сухую готовую смесь (СГС), состоящую из всех компонентов (за исключением портландцемента). Далее СГС перемешивали с цементом до получения однородной смеси. Затем добавляли воду до получения требуемой подвижности П4. Бетонную смесь заливали в формы и ставили в камеру нормального твердения. Образцы испытывали через 28 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Был проведен планированный трехфакторный эксперимент, по результатам которого получены математические модели зависимостей предела прочности на сжатие ρ , средней плотности R и коэффициента конструктивного качества KKK от содержания микронаполнителя, суперпластификатора и дисперсного волокна:

$$\begin{aligned}\rho &= 1706 - 18,3 \cdot x_1 + 8,9 \cdot x_2 - 10,9 \cdot x_3 + 1,2 \cdot x_1^2 + 8,8 \cdot x_2^2 - 11,7 \cdot x_3^2 + \\ &\quad + 12,8 \cdot x_1 \cdot x_2 - 10,8 \cdot x_1 \cdot x_3 - 3,7 \cdot x_2 \cdot x_3; \\ R &= 32,8 + 0,83 \cdot x_1 + 2,4 \cdot x_2 + 0,032 \cdot x_3 - 0,91 \cdot x_1^2 + \\ &\quad + 0,19 \cdot x_2^2 - 0,42 \cdot x_3^2 - 0,07 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,08 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,09 \cdot x_2 \cdot x_3; \\ KKK &= 19,203 + 0,681 \cdot x_1 + 1,32 \cdot x_2 - 7,37 \cdot x_3 - 2,73 \cdot x_1^2 - 6,17 \cdot x_2^2 + \\ &\quad + 2,37 \cdot x_3^2 - 0,72 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,84 \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,14 \cdot x_2 \cdot x_3,\end{aligned}$$

где X_1 – содержание микрокремнезема; X_2 – содержание Melflux 5581F; X_3 – содержание базальтового волокна.

Результаты представлены на рис. 1, 2.

Анализ математических моделей показывает, что наибольшее влияние на рост прочности и коэффициента конструктивного качества керамзитобетона оказывает добавка суперпластификатора Melflux 5581F. При введении оптимального количества добавки за счет водоредуцирования и уплотнения межпорового пространства (между зернами КП) прочность увеличивается на 24 %, KKK – на 32 %. Вторым по значимости является фактор введения микрокремнезема. При введении оптимального количества микрокремнезема увеличиваются прочность и коэффициент конструктивного качества, а средняя плотность уменьшается.

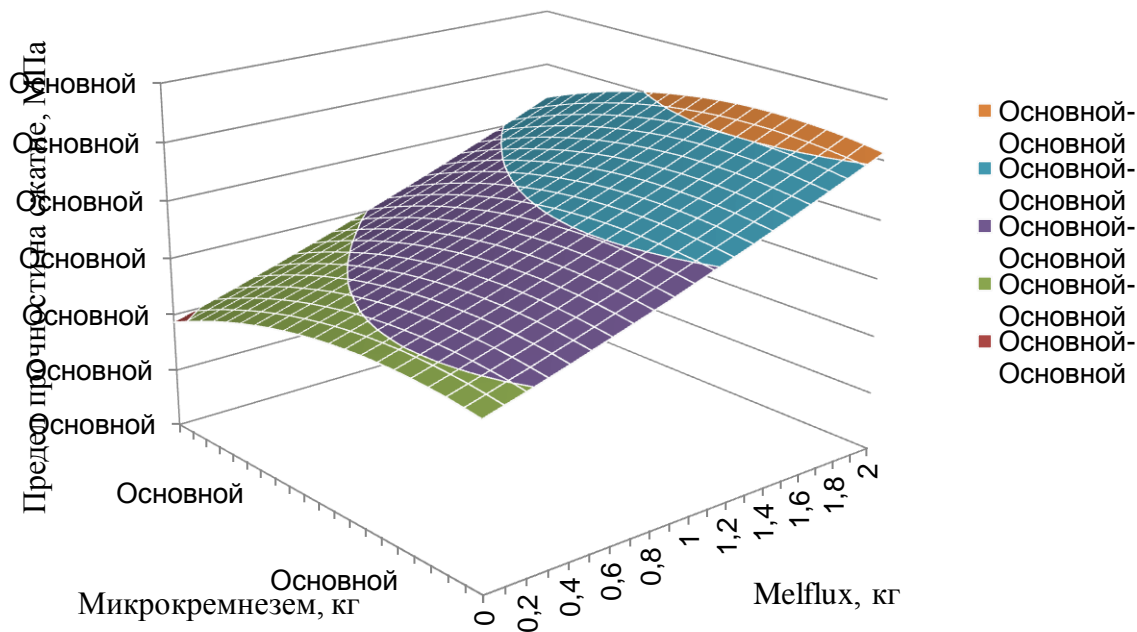


Рис. 1. Диаграмма зависимости прочности керамзитобетона от содержания Melflux 5581F и микрокремнезема

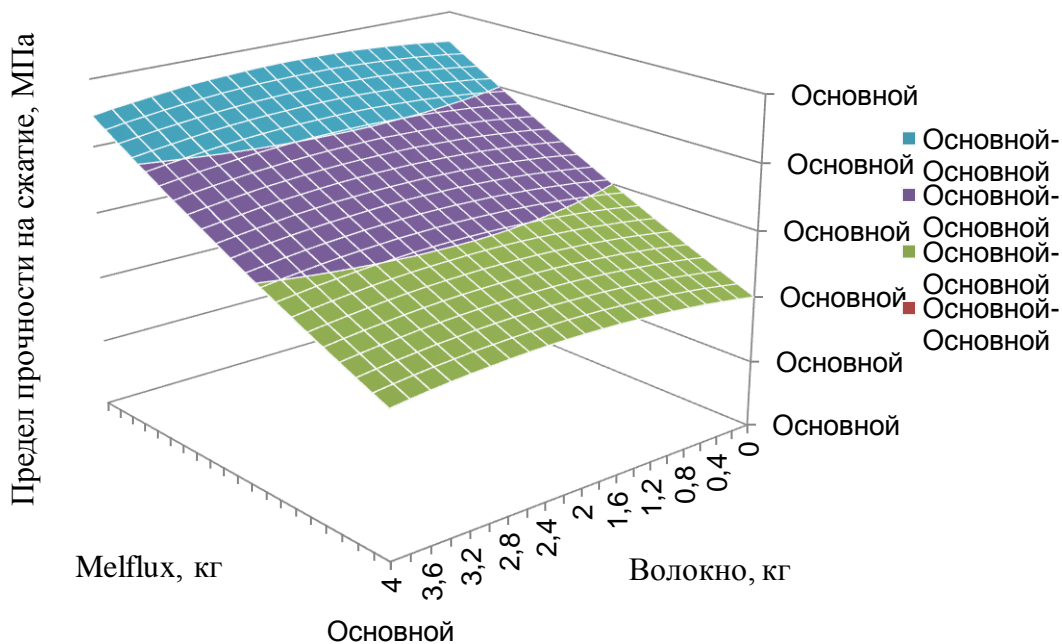


Рис. 2. Диаграмма зависимости прочности керамзитобетона от содержания Melflux 5581F и базальтового волокна

При введении базальтовых волокон до 4 кг на 1 м³ керамзитобетона отмечается небольшой прирост прочности на сжатие. Однако при превышении оптимальной объемной дозировки волокон прочностные

характеристики начинают падать. Из-за перенасыщения бетона волокном происходит ухудшение структуры бетона. Основное значение базальтовых волокон – формирование более упорядоченных и однородных структур керамзитобетона, характеризующихся повышенным сопротивлением развитию трещин. В итоге это ведет к снижению вероятности опасного хрупкого разрушения керамзитобетона с высокой прочностью, росту его способности к восприятию механических, динамических воздействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные математические модели зависимости предела прочности на сжатие, средней плотности и коэффициента конструктивного качества от содержания микронаполнителя, суперпластификатора и дисперсного волокна позволяют прогнозировать свойства и подобрать оптимальные составы керамзитобетона. Полученные данные будут применяться для разработки конструкционного керамзитобетона классов по прочности В25-В30 с маркой по подвижности ПЗ, П4 для монолитного строительства. Такие бетоны позволяют более чем на 30 % уменьшить нагрузку на конструкционные элементы сооружения, сохранить несущие характеристики, уменьшить стоимость строительства и улучшить теплофизические свойства конструкции.

Библиографический список

1. Королев, Е.В. Особенности реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах / Е.В. Королев, А.С. Иноземцев // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 100–108.
2. Ружицкая, А.В. О воздействии различных типов добавок-пластификаторов на свойства портландцемента / А.В. Ружицкая // Вестник СПбГАСУ. 2013. С. 28–33.
3. Зубова, М.О. Мелкозернистые бетоны с применением базальтовой фибры и комплексных модифицирующих добавок: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Зубова Мария Олеговна. Волгоград, 2015. 159 с.
4. Ярмаковский, В.Н. Физико-химические структурно-технологические основы получения высокопрочных и высокодолговечных конструкционных легких бетонов / В.Н. Ярмаковский // Строительные материалы. 2016. № 6. С. 6–10.
5. Московский, С.В. Влияние дисперсного армирования на деформационно-прочностные свойства бетона / С.В. Московский [и др.] // УРАЛНИИПРОЕКТ. 2016. № 3. С. 67–71.
6. Амелина, Д.В. Композиционное вяжущее на основе портландцемента и волокон / Д.В. Амелина, Л.И. Сычева // Успехи в химической технологии. 2013. № 7. С. 7–11.
7. Гурьева, В.А. Свойства цементных растворов, дисперсно-армированных модифицированным микроволокном / В.А. Гурьева,

Т.К. Белова // Вестник Оренбургского университета. 2015. № 13. С. 124–127.

8. Деревянко, В.Н. Влияние низкомодульных волокон на свойства строительных растворов / В.Н. Деревянко, Л.В. Саламаха, А.Г. Смоглий // Вестник Оренбургского университета. 2015. № 13. С. 124–127.

9. Предтеченский, М.В. Влияние кремнеземной пыли на формирование свойств высокопрочных бетонов / М.В. Предтеченский // Строительные материалы. 2016. № 8. С. 76–79.

10. Лукутцова, Н.П. Роль микро- и нанодисперсных добавок в структурообразовании мелкозернистого бетона / Н.П. Лукутцова // Технологии бетонов. 2014. № 10. С. 24–39.

УДК 691.3

ИССЛЕДОВАНИЕ КАМЕННЫХ ПОРОД РАЗЛИЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Р.Н. Москвин, В.С. Юрова

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что дисперсная каменная мука оказывает огромное влияние на свойства бетонов. Особенно это влияние проявляется в высоконаполненных порошковых (ПБ) и порошково-активированных бетонах (ПАБ) при формировании их структуры, где доля дисперсных компонентов (без учета цемента) составляет до 50–70 % от объема.

Дисперсные наполнители представляют собой тонкомолотое порошкообразное вещество природного или техногенного происхождения с удельной поверхностью, сопоставимой с удельной поверхностью цемента или более (в пределах 250–500 м²/кг). Достаточно высокое содержание наполнителей в составе пластифицированных бетонов позволяет уменьшить водопотребность смеси, вяжущего, уменьшить диапазон температурных и усадочных деформаций; увеличить прочность, плотность, твердость и другие физические и механические свойства [1].

Уровень влияния тонкодисперсных минеральных наполнителей на свойства бетонов напрямую зависит от их происхождения, химического и минералогического состава, формы и крупности частиц, количественного содержания в смеси и других факторов [4, 5].

Одним из важнейших признаков возможности использования горных пород в качестве тонкодисперсного наполнителя в порошково-активированных, реакционно-порошковых современных бетонах является показатель водопоглощения исходной горной породы. Водопоглощение горных пород зависит от их пористости и характера пор: количества открытых и сообщающихся пор, оцениваемых эффективной пористостью, а также размерами пор.

Глубинные горные породы магматического происхождения, характеризующиеся полнокристаллической структурой (граниты, сиениты, лабрадориты, диабазы и габбро), имеют низкие показатели водопоглощения. Другие горные породы магматического происхождения, которые образуются в результате вулканического извержения на поверхность так называемой лавы, имеют скрытокристаллическую или мелкокристаллическую структуры и значительную пористость (вулканические пеплы, порфиры, туфы, базальты, пемзы).

Осадочные горные породы – это продукты разрушения изверженных пород, осаждения малорастворимых минералов из водных бассейнов или жизнедеятельности животных и растений. Они часто характеризуются достаточно высокой пористостью и трещиноватостью. К ним относятся как сцементированные отложения (известняки, брекчии, доломиты, конгломераты и др.), так и рыхлые (глины, пески, гравий и щебень и их смеси).

Метаморфические – это горные породы, которые образовались переходом осадочных и изверженных пород под влиянием высоких и сверхвысоких давлений, температур и химических процессов. Это мрамор, песчаники, кварциты, а также сланцеватые породы – гнейсы и сланцы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования пригодности каменной муки в качестве тонкодисперсного наполнителя в составе реологической матрицы современных эффективных бетонов были взяты следующие породы различного генезиса: доломит, доломитизированный известняк (месторождение Пензенской обл.), кальцитовый известняк (месторождение г. Тольятти), песчаник (месторождение Пензенской обл.), гранит, диабаз и базальт, плотная опока (месторождение г. Пензы), диатомит (месторождение Пензенской обл.).

Исследования проводились по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 8269.0-97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Тонкомолотую каменную муку для дальнейшего использования ее в качестве мелкодисперсного наполнителя при изготовлении порошковых и порошково-активированных бетонов можно получить двумя способами. Первый – применять высококачественное каменное сырье в виде добытых в карьере массивных камней с последующим длительным дроблением и измельчением до необходимого размера частиц. Второй – использовать вторичное сырье, а именно отходы и отсеvy камнедробления, полученные в результате производства широкой номенклатуры изделий, получаемых из горных пород. Последний способ является более энергосберегающим, экологичным и не требует мощных дробильных агрегатов, так как на

предприятия по изготовлению мелкодисперсных материалов они поступают в виде смеси фракций от 0 до 5 мм.

Однако необходимо отметить, что не все горные породы безоговорочно могут быть использованы при производстве бетонов. Так, например, рыхлые и слабые горные породы (мел, диатомит, опока) не могут применяться при изготовлении современных высококачественных бетонов повышенной прочности, так как введение в состав бетонной смеси высоководопотребных материалов приведет к увеличению водотвердого отношения, увеличению пористости затвердевшего бетона и снижению его прочности [2, 3]. Кроме того, исходные свойства горных пород сохраняются не только при использовании их в качестве щебня, но и в качестве мелкодисперсного наполнителя.

С целью установления пригодности отсеков камнедробления горных пород для использования в качестве каменной муки в современных высокопрочных бетонах были проведены исследования нормированных параметров по стандартным методикам в соответствии с ГОСТ 8269.0-97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. В соответствии с данным стандартом проводились работы по определению:

- истинной и средней плотности горной породы,
- содержания пылевидных и глинистых частиц,
- дробимости,
- содержания слабых зерен в горной породе,
- морозостойкости.

Результаты исследований представлены в табл. 1–5.

Таблица 1. Результаты определения истинной и средней плотности горной породы

Каменная порода	Истинная плотность (средняя плотность), кг/м ³	Каменная порода	Истинная плотность (средняя плотность), кг/м ³
Известняк (месторождение Пензенской обл.)	2 470 (2 210)	Песчаник Никольский	2 510 (2 270)
Известняк (месторождение г. Тольятти)	2 510 (2 450)	Диатомит	2 500 (654)
Доломит	2 840 (2 510)	Гранит	2 590 (2 590)
Мрамор	2 540 (2 490)	Базальт	2 670 (2 670)
Песчаник Саловский	2 570 (2 430)	Диабаз	3 040 (3 040)

Таблица 2. Результаты определения содержания пылевидных и глинистых частиц

Каменная порода	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе	Каменная порода	Содержание пылевидных и глинистых частиц, % по массе
Известняк (месторождение Пензенской обл.)	1.1–1.5	Песчаник Никольский	2.5–3
Известняк (месторождение г. Тольятти)	0.5–0.6	Диатомит	Не определялось
Доломит	0.5–0.6	Гранит	0.05–0.1
Мрамор	0.4–0.5	Базальт	0.05–0.1
Песчаник Саловский	0.9–1.0	Диабаз	0.05–0.1

Таблица 3. Результаты определения дробимости (критерий прочности)

Каменная порода	Дробимость / потеря массы при испытании щебня, %	Каменная порода	Дробимость / потеря массы при испытании щебня, %
Известняк (месторождение Пензенской обл.)	800/14	Песчаник Никольский	800/13
Известняк (месторождение г. Тольятти)	1 200/11	Диатомит	Не определялась
Доломит	1 200/9	Гранит	1 400/8
Мрамор	1 200/9	Базальт	1 400/9
Песчаник Саловский	1 000/12	Диабаз	1 400/7

Таблица 4. Результаты определения содержания слабых зерен в горной породе

Каменная порода	Содержание слабых зерен в горной породе, %	Каменная порода	Содержание слабых зерен в горной породе, %
Известняк (месторождение Пензенской обл.)	12–15	Песчаник Никольский	9–7
Известняк (месторождение г. Тольятти)	1 200/11	Диатомит	Не определялась
Доломит	2–3	Гранит	Нет
Мрамор	Нет	Базальт	Нет
Песчаник Саловский	4–5	Диабаз	Нет

Таблица 5. Результаты определения морозостойкости

Каменная порода	Марка по морозостойкости (количество циклов / потеря массы после испытания, %)	Каменная порода	Содержание слабых зерен в горной породе, %
Известняк (месторождение Пензенской обл.)	F150 (15/4.7)	Песчаник Никольский	F150 (15/4.8)
Известняк (месторождение г. Тольятти)	F300 (15/1.8)	Диатомит	Не определялась
Доломит	F300 (15/1.7)	Гранит	F400 (15/0.7)
Мрамор	F300 (15/1.4)	Базальт	F400 (15/0.8)
Песчаник Саловский	F200 (15/2.7)	Диабаз	F400 (15/0.7)

Примечание. Морозостойкость породы определялась по ускоренной методике насыщением образцов в растворе сернокислого натрия и последующим высушиванием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное исследование показало, что магматические породы отличаются высокими физико-механическими показателями по прочности, морозостойкости, отсутствием примесей глинистых частиц. Плотные карбонатные породы (известняк (г. Тольятти), доломит и мрамор) также демонстрируют хорошие значения своих характеристик. Известняк (Пензенская обл.) отличается неоднородностью своих показателей, которые могут различаться в зависимости от места залегания пласта. Данный известняк и песчаник Никольский также могут содержать в своем составе глинистые примеси.

Необходимо отметить, что стандартные методики исследования свойств каменных пород не дают возможности однозначно определить пригодность материала для использования его в производстве современных бетонов, так как они не позволяют оценивать реологические свойства водно-минеральных суспензий.

Библиографический список

1. Баженов, Ю.М. Технология бетона: учебник / Ю.М. Баженов. М.: АСВ, 2007. 528 с.
2. Белякова, Е.А. Реологически-активные дисперсные наполнители современных цементных бетонов / Е.А. Белякова, Р.Н. Москвин, В.С. Юрова // Образование и наука в современном мире. Инновации. 2018. № 4 (17). С. 182–188.
3. Белякова, Е.А. Критерии пригодности горных пород для использования в современных бетонах / Е.А. Белякова, В.С. Юрова // Проблемы научной мысли. 2018. Т. 2. № 1. С. 80–83.

4. Калашников, В.И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Технологии бетонов. 2015. № 11-12 (112-113). С. 27–35.

5. Калашников, В.И. Терминология науки о бетоне нового поколения / В.И. Калашников // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 103–106.

УДК 666.7

КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДОМЕННОГО ШЛАКА (BFS)

М.Ю. Назарова

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на появление большого числа новых для России строительных материалов, керамический кирпич продолжает широко применяться как стеновой материал. Стремительный рост строительства в последнее время обусловил потребность в увеличении производства кирпича и привел к тому, что мировая строительная отрасль (и российская в том числе) начала испытывать дефицит сырья, в особенности высококачественного глинистого сырья, являющегося основной составляющей в производстве керамических строительных материалов. В результате интенсивной разработки немало месторождений глинистых минералов почти полностью освоены, а запасы сырья в остальных очень быстро сокращаются. В европейской части России известные месторождения красных и светлоглушихся глин совершенно истощены или находятся на грани истощения. Требуется изыскания и разработка новых месторождений, что сопряжено с немалыми финансовыми вложениями, либо поиск радикальных путей, которые способны разрешить или облегчить решение этих проблем. Наиболее разумным из этих способов является применение при изготовлении стеновых керамических материалов в качестве сырья техногенных продуктов, в том числе гранулированных доменных шлаков.

Введение побочных продуктов металлургического производства в состав масс для получения керамических материалов позволяет сделать производство ресурсосберегающим, менее затратным и в какой-то мере позволяет решить экологические проблемы окружающей среды.

Доменный шлак (BFS), получаемый как побочный продукт выплавки чугуна, уже давно успешно используется как минеральная добавка в смешанных цементах [1], строительных материалах автоклавного твердения [2, 3], в производстве стеклокерамики. Ограниченное количество исследований было проведено для доменного шлака (BFS) как сырья в керамических массах при спекании [4, 5]. Цель

статьи – исследование целесообразности получения керамических строительных материалов из доменного шлака без добавок и с добавкой глинистого компонента с использованием традиционного процесса спекания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для определения фазового состава сырьевых материалов и продуктов спекания применялись методы рентгенофазового анализа и кристаллооптический метод. Рентгенофазовый анализ проводился на аппаратах «ДРОН-3» (Cu – анод, Ni – фильтр). Идентификация дифрактограмм осуществлялась по каталогу JCPDS, с использованием электронной карточки PDF-2, разработанной компанией ICDD (США), и пакета программ PDWIN (порошковых методов рентгенографического анализа). Кристаллооптические исследования проводились на поляризационном микроскопе МИН-8. Определение показателей светопреломления минеральных фаз производилось иммерсионным методом по полоске Бекке с использованием стандартного набора иммерсионных жидкостей. Исследование проводилось на иммерсионном препарате при одном никеле с объективом 9^x или 20^x. Диагностика минеральных фаз в исходных материалах и продуктах обжига осуществлялась при параллельных и скрещенных николях с использованием прозрачных микроскопических препаратов – шлифов. Установление процентного содержания минеральных фаз проводилось с помощью окулярной сетки.

Для измельчения доменного шлака использовалась керамическая шаровая мельница. Помол осуществлялся до удельной поверхности 350–360 м²/кг. Алюмосиликатное глинистое сырье высушивалось при температуре 100–120 °С, размалывалось до остатка на сите № 0.063 не более 2–3 %. Для того чтобы отделить шлаковый песок от крупных включений проводилось просеивание через сито № 2.5. Образцы-цилиндры Ø 35 x 35 мм изготавливались способом полусухого формования. Прессование проводилось на гидравлическом прессе ПСУ-50 при давлении 40–50 МПа, влажность сырца составляла 7–10 %, увлажнение смеси производилось 0.5 % водным раствором ЛСТ. Сушка образцов проводилась в лабораторном сушильном шкафу при температуре 110–120 °С. Затем высушенные образцы подвергались обжигу на исследуемые температуры (1 100, 1 150, 1 200 и 1 250 °С) с выдержкой при максимальной температуре 2 ч. Определение кажущейся плотности, открытой пористости и водопоглощения образцов производилось в соответствии с ГОСТ 2405. Мониторинг морозостойкости осуществлялся методом объемного замораживания в лабораторной морозильной камере с автоматически регулируемой температурой в пределах от –15 до –20 °С.

Для статистической обработки полученных данных проводились вычисления величины генеральной дисперсии и доверительных интер-

валов с использованием результатов текущих измерений при общем их количестве 145 и числе степеней свободы 43 и проверки на однородность методики Кохрана. В результате получено численное значение среднего квадратичного отклонения при доверительной вероятности 0.95, равное 7.35 %. Рассчитаны значения доверительных интервалов прочности при сжатии, в которых различие между максимальными и минимальными значениями составляло не более 3–4 МПа.

В качестве основного сырьевого компонента использовался доменный гранулированный шлак витрофирового типа с содержанием кристаллического компонента 10–25 %. Химический состав представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав доменного шлака

Химический состав, масс. %									$M_{\text{очн}}$
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	0.76
43.9	11.4	38.7	3.59	0.2	0.35	0.31	0.88	0.21	

Состав кристаллической части представлен (рис. 1) мелилитом Ca₂(Al,Mg)[(Si,Al)₂O₇], окерманитом (d/n, Å – 5.039, 4.230, 3.079, 2.867). Второе место в количественном отношении занимает мервинит 3CaO·MgO·2SiO₂ (d/n, Å – 2.71, 2.683, 2.652, 2.468, 2.287). Среди второстепенных минералов доминируют анортит Ca[Al₂Si₂O₆] (d/n, Å – 3.27, 3.15, 3.36), монтичеллит CaMg[SiO₄] (d/n, Å – 2.66, 1.84, 2.58, 2.38, 2.28) и ларнит (d/n, Å – 5.522, 3.35, 3.290, 3.038, 2.921, 2.738, 2.571).

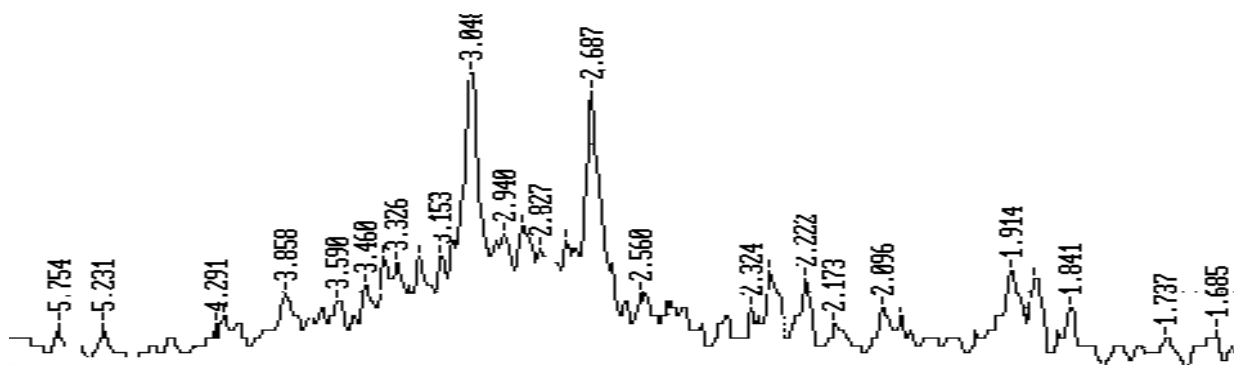


Рис. 1. Рентгенограмма доменного шлака

В качестве связки использовалась тугоплавкая каолинит-гидрослюдистая глина. Минералогический состав глины представлен каолинитом (рис. 2) (d/n, Å – 7.254, 4.488, 3.858, 3.597, 3.357), иллитом (d/n, Å – 10.589, 5.829, 4.997, 4.484, 4.067, 2.132), монтмориллонитом (d/n, Å – 13.49, 4.48, 2.92), кварцем (d/n, Å – 3.57, 3.597, 2.132, 1.951, 1.85, 1.675, 1.591, 1.545, 1.492).

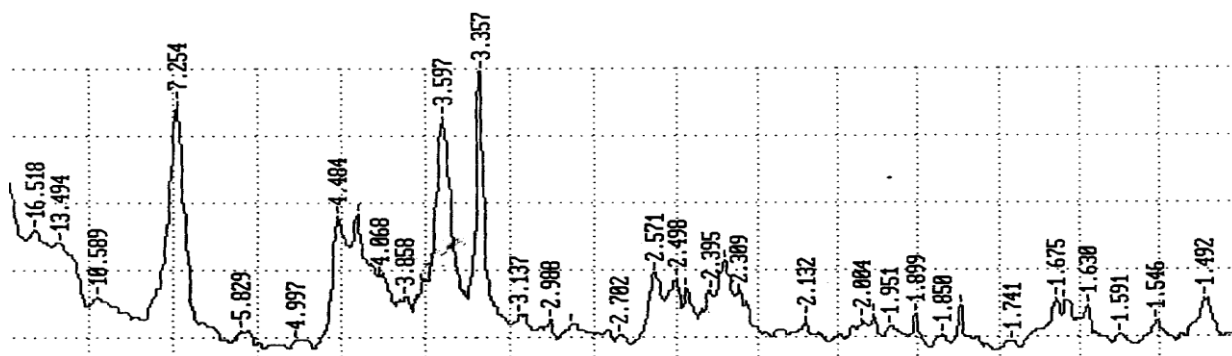


Рис. 2. Рентгенограмма глины Берлинского месторождения

Химический состав глины представлен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав глинистого сырья

Месторождение	Химический состав, масс. %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	ппп	Σ
Берлинское (Оренбургская обл.)	49.9	30.74	0.85	1.51	2.62	1.05	0.76	0.17	12.4	100

Берлинская глина обладает высокой дисперсностью (90–94 % зерен менее 2 мкм), что обуславливает ее высокую пластичность и пригодность в качестве связки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Доменный шлак представляет собой метастабильный стекловидный материал, который может трансформироваться в стабильное кристаллическое состояние при термической обработке. Это преобразование называется девитрификацией или кристаллизацией [3]. Кристаллизация шлакового стекла играет ключевую роль в процессах спекания и упрочнения.

Термообработанные при 1 150 °С образцы без добавки глины с содержанием заполнителя (гранулированного шлака) 10 % (рис. 3) представлены мелилитом ($d/n, \text{Å} - 4.25, 3.731, 3.493, 3.089, 2.871, 2.759, 2.518, 2.465, 2.401, 2.309, 2.217, 2.127, 2.040, 1.987, 1.947, 1.89, 1.857, 1.838, 1.762$).

В сырце состава на основе доменного шлака и глины Берлинского месторождения (рис. 4) обнаружены фазы мелилита ($d/n, \text{Å} - 3.063, 2.867, 2.522, 2.462, 2.318, 2.284, 2.194, 2.134, 2.032, 1.983, 1.929, 1.916, 1.824, 1.766$), волластонита ($d/n, \text{Å} - 2.95, 2.557$), каолинита ($d/n, \text{Å} - 7.284, 4.162, 3.809, 3.715, 3.567, 3.35, 3.126, 3.095, 2.284, 2.154, 2.060, 1.685, 1.667$), анортита ($d/n, \text{Å} - 3.969, 3.215, 2.818$), кварца ($d/n, \text{Å} - 4.281, 3.357, 2.462, 2.284, 1.983$).

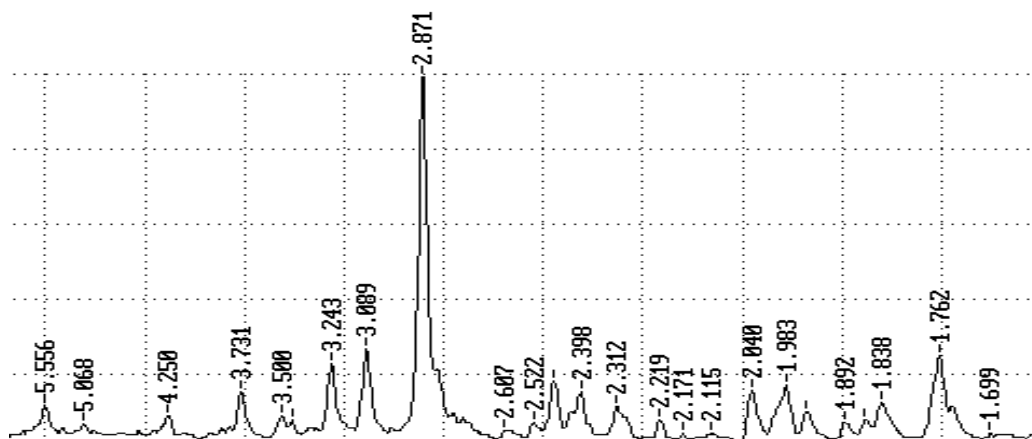


Рис. 3. Рентгенограмма обожженного образца керамики на основе доменного шлака без добавок ($T_{\text{обж}} - 1\ 200\ ^\circ\text{C}$)

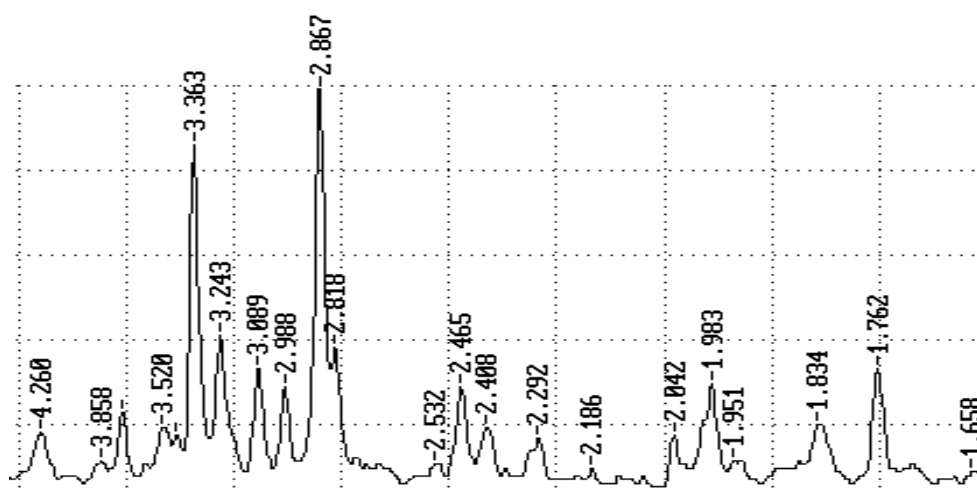


Рис. 4. Рентгенограмма образца керамики с добавкой глины

Термообработанные при $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ образцы данного состава (см. рис. 4) состоят из мелилита ($d/n, \text{Å} - 4.24, 3.723, 3.5, 3.084, 2.871, 2.767, 2.553, 2.518, 2.465, 2.417, 2.395, 2.309, 2.217, 2.134, 2.040, 1.979, 1.949, 1.892, 1.838, 1.762, 1.675$), анортита ($d/n, \text{Å} - 4.72, 4.049, 3.909, 3.633, 3.37, 3.203, 2.993$). При температуре обжига $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ на рентгенограммах наблюдается увеличение интенсивности отражений диопсида ($d/n, \text{Å} - 4.049, 3.641, 3.363, 3.215, 2.998$), появляется кристобалит.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что образцы без добавок глинистого компонента в интервале температур $800-1\ 100\ ^\circ\text{C}$ имеют незначительное изменение физико-механических показателей (от 5–7 до 10–14 МПа). При дальнейшем повышении температуры до $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ наблюдается более крутой подъем кривой прочности кислого шлака (до 70 МПа). Повышение температуры до $1\ 250\ ^\circ\text{C}$ вызвало плавление образцов. Значения усадочных деформаций в интервале температур $800-1\ 100\ ^\circ\text{C}$ не превышают 5%. Дальнейшее повышение температуры до $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ вызывает в образцах без добавки

глинистого компонента увеличение значения объемной усадки до 23 %. При этом кажущаяся пористость уменьшается с 27 до 3 % .

При введении в состав шихты глинистой составляющей наблюдаются рост прочности сырца и увеличение содержания глинистого компонента в составе шихты. Анализ физико-механических характеристик обожженных образцов стеновой керамики с добавкой глинистого компонента свидетельствует об увеличении интервала спекания по сравнению с составами на основе чистых шлаков. Такой показатель качества может зависеть более чем от пяти факторов (для кирпича): минералогического, химического, гранулометрического составов исходного сырья, композиционного соотношения сырьевых материалов, условий производства, структуры и текстуры изделий. Сложность изготовления изделий с заданными свойствами по морозостойкости определяется как влиянием каждого фактора по отдельности, так и влиянием их соотношений. Зависимость водопоглощения и коэффициента насыщения (отношения водопоглощения при погружении образца в воду к полному водопоглощению при кипячении его в воде) косвенно указывает на морозостойкость изделия. При отношении $S > 0.9$ изделия неморозостойкие, при $S = 0.8-0.9$ вероятно частичное разрушение, при $S < 0.9$ изделие морозостойкое. Проанализировав морозостойкость образцов стеновой керамики на чистых шлаках и с добавкой глинистого компонента необходимо отметить, что $T_{обж} = 1150^{\circ}\text{C}$ является оптимальной для всех составов. Температура и интервал спекания керамических материалов с повышенным содержанием щелочно-земельных оксидов (CaO , MgO) зависят не только от общего содержания в сырьевой смеси оксидов, но и фазового состояния их соединений, а также от типа структуры шлакового компонента. Так, если щелочно-земельный компонент в керамической смеси представлен свободными оксидами кальция или магния, которые образуются из карбонатов этих элементов, то наблюдается интенсивное спекание в узком интервале температур, что обусловлено сильным химическим взаимодействием этих оксидов с кислым шлаковой составляющей или другими силикатными составляющими. Если оксиды кальция или магния входят в состав волластонита, мелилита, диопсида либо других устойчивых кристаллических соединений, которые не столь энергично реагируют с более кислыми составляющими сырьевой смеси, то интервал твердофазного спекания существенно расширяется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В составах с доменным шлаком без добавок наблюдается скачкообразное увеличение прочностных характеристик в интервале температур $1150-1200^{\circ}\text{C}$ и огневой усадке до 10 %. Резкое изменение прочностных характеристик в небольшом интервале температур обжига связано с узким интервалом спекания исследуемых шлаков. Целесообразно

ввод глинистого компонента в состав шихты. При этом значительно расширяется интервал спекания (до 100–150 °С), формируются более стабильные физико-механические характеристики. Общие физико-химические предположения, подкрепленные экспериментальными данными, полученными в работе, дают возможность сделать вывод о том, что по мере увеличения степени кристалличности и величины кристаллов, составляющих шлаковое сырье, более затруднены процессы их взаимодействия с более кислым компонентом смеси, что приводит к увеличению интервала твердофазного спекания.

Библиографический список

1. Антонов, Г.И. Использование металлургических шлаков в технологии доломитовых огнеупоров / Г.И. Антонов [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. 1996. № 12. С. 16–20.
2. Будников, П.П. Реакции в смесях твердых веществ / П.П. Будников, А.М. Гинслинг. М.: Стройиздат, 1971. 478 с.
3. Гончаров, Ю.И. Исследование процессов спекания металлургических шлаков / Ю.И. Гончаров, А.С. Иванов, М.Ю. Гончарова (Назарова) // Известия вузов. Строительство. 2003. № 7. С. 51–55.
4. Третьяков, Ю.Д. Твердофазные реакции / Ю.Д. Третьяков // Соросовский образовательный журнал. 1999. № 4. С. 35–39.
5. Zahide, B. Ozturk. Preparation of ceramic wall tiling derived from blast furnace slag / Zahide B. Ozturk, Elif Eren Gultekin // Ceramics International. Vol. 41. Iss. 9. Part B. 2015. P. 12020–12026.

УДК 691.32

ПОЛУЧЕНИЕ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА НА СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛАХ ИЗ БЕТОННОГО ЛОМА СНОСИМЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

В.В. Наруть, О.А. Ларсен

В последние годы в отечественной строительной практике для решения различного рода задач стал активно применяться самоуплотняющийся бетон (СУБ). Использование СУБ позволяет увеличить производительность труда, а также повысить качество железобетонных/бетонных изделий и конструкций. Однако более широкое распространение СУБ сдерживается его недостатками, например дороговизной, которая объясняется особенностью подбора состава бетона. Для снижения себестоимости СУБ целесообразно использование различных отходов промышленности.

При реализации Федерального закона № 141-ФЗ по реновации в г. Москве образуется в ходе демонтажа ветхих зданий огромное

количество строительных отходов, большая часть которых представляет собой железобетонный и бетонный лом. Утилизация данных материалов является важным экологическим аспектом [1, 2].

Наиболее эффективным видится централизованная переработка бетонного лома методом дробления для производства щебня необходимых фракций и отсева. Существует возможность проявления отсевом дробления бетонного лома вторичных вяжущих свойств, вызванных присутствием в нем не до конца прореагировавших частиц цемента. Для эффективного использования потенциала данного материала его необходимо подвергать активации. Полученный материал целесообразно применять в качестве микронаполнителя в самоуплотняющихся бетонных смесях [2–7].

В работе использовались следующие сырьевые материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5Б, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 31108-2016 [8]; песок в соответствии с Мк, равным 1,8; бетонный лом демонтированной внутренней стеновой панели 9ВС1 жилого дома серии 1605-АМ-5 микрорайона Кунцево, попавшего под программу реновации г. Москвы. Химический состав бетона представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав бетонного лома

Образец	Содержание оксидов на прокаленное вещество, %											∑ прочих незначи- тельных оксидов
	SiO ₂	CaO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	SO ₃	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	SrO	
Панель 1605-АМ-5	39.45	49.0	3.74	2.52	1.76	1.12	1.05	0.587	0.153	0.222	0.074	0.324

Суперпластификатор на поликарбоксилатной основе – Sika ViscoCrete E55; суперпластификатор сухой на поликарбоксилатной основе – Melflux 5581F; вода водопроводная, отвечающая требованиям [9].

Часть используемой стеновой панели разбивалась механическим методом и очищалась от арматурных элементов. После более мелкие куски размером ≈ 40–50 мм дробились в цилиндре Ø 150 мм для испытания щебня на дробимость и просеивались на ситах 12.5; 10; 7.5; 5; 2.5 для получения фр. 5–10 мм, соответствующей по зерновому составу требованиям [10] и отсева дробления фр. 0–5 мм. Физико-механические характеристики полученного щебня из дробленого бетона фр. 5–10 мм приведены в табл. 2.

Таблица 2. Физико-механические характеристики щебня фр. 5–10 мм

№ п/п	Определенный показатель	Фактическое значение
1	Дробимость (марка по прочности) во влажном состоянии	M 400
2	Содержание пылевидных частиц, % по массе	2.2
3	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, % по массе	22.3
4	Содержание зерен прочностью менее 20 МПа, % по массе	9.6
5	Средняя плотность зерен, кг/м ³	1 900

Отсев дробления фр. 0–5 мм подвергался активации в лабораторной вибромельнице совместно с сухим суперпластификатором Melflux 5581F. Режим помола устанавливался экспериментально из условия оптимальной работы помольного оборудования для получения микронаполнителя удельной поверхности порядка 4 500 см²/г. Оптимальная дозировка Melflux 5581F, обеспечивающая интенсификацию помола, в интервалах, исключаящих негативные последствия при последующем применении наполнителя в бетонной смеси, вызванных передозировкой, составила 0,5 % от массы первоначального отсева. При данной дозировке величина удельной поверхности возрастает на 15,65 % от контрольного (бездобавочного) состава (с 3 956 до 4 575 см²/г).

Следующим этапом исследования было определение количества полученного микронаполнителя в композиционном вяжущем. Критерием дозировки микронаполнителя являлось максимальное уменьшение нормальной густоты цементной системы. Определено, что оптимальная величина микронаполнителя после помола отсева дробления в вибромельнице в течение 150 мин. составляет 22 % с дозировкой Melflux 5581F 0.5 % от массы первоначального отсева. При этом нормальная густота композиционного цементного теста уменьшилась с 26.5 до 22.4 %.

Проектирование зернового состава смеси используемых заполнителей (песка и щебня из дробленого бетона фр. 5–10 мм) осуществлялось из условий получения самоуплотнения: доля песка в объеме растворной части бетонной смеси (цемент + добавки + песок + вода) должна находиться в диапазоне 40–50 %. Соотношение объемов мелкого и крупного заполнителей должно быть в диапазоне от 45:55 до 50:50 объемных процентов.

Подбор состава самоуплотняющегося бетона определялся с учетом общепринятых закономерностей: пониженное содержание крупного заполнителя, повышенное содержание вяжущего теста, регулирование текучести дозировкой пластификаторов.

Итогом работы стало получение самоуплотняющегося бетона, состав бетона представлен в табл. 3, характеристики даны в табл. 4.

Таблица 3. Состав самоуплотняющегося бетона

№ п/п	Компоненты самоуплотняющейся бетонной смеси	Расход на м ³ , кг
1	Портландцемент	475
2	Микронаполнитель	135
3	Щебень из дробленого бетона	585
4	Песок	685
5	Sika ViscoCrete E55	2.14
6	Вода	230

Таблица 4. Характеристики самоуплотняющейся смеси и бетона

Самоуплотняющаяся бетонная смеси		Самоуплотняющийся бетон	
Показатель	Фактическое значение	Показатель	Фактическое значение
Распływ конуса, мм	580	Прочности при сжатии, МПа, сут	3
Вязкость t ₅₀₀ , сек	15		7
Плотность, кг/м ³	2 114		28
		Морозостойкость F ₁	200
		Водонепроницаемость W	6

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы: обоснована возможность применения бетонного лома в качестве материала для самоуплотняющегося бетона; указано, что отсев дробления щебня из дробленого бетона целесообразно подвергать активации совместно с сухим суперпластификатором на поликарбоксилатной основе; определено, что оптимальная дозировка Melflux 5581F – 0.5 % от массы отсева – обеспечивает увеличение удельной поверхности микронаполнителя на 15.65 % от контрольного (бездобавочного) состава при активации в вибромельнице; установлено, что оптимальная величина микронаполнителя после помола отсева дробления в вибромельнице в течение 150 мин. составляет 22 % с дозировкой Melflux 5581F 0.5 % от массы первоначального отсева. При этом нормальная густота композиционного цементного теста уменьшилась с 26.5 до 22.4 %; рассчитан состав самоуплотняющегося бетона с прочностью при сжатии в возрасте 28 сут (38.4 МПа).

Библиографический список

1. Naruts, V. SCC with activated recycled concrete fines / V. Naruts, O. Larsen, A. Bakhrakh // MATEC Web Conf. 239 (2018) 01024. Published online: 27 November 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823901024>.
2. Баженов, Ю.М. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов: монография / Ю.М. Баженов, Л.А. Алимов, В.В. Воронин. М.: МГСУ, 2013. 204 с.

3. Sagoe-Crentsil, K.K. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate / K.K. Sagoe-Crentsil, T. Brown, A.H. Taylor // *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31. Iss. 5. P. 707–712.

4. Beauchemin, S. Evaluation of the concrete prisms test method for assessing the potential alkali-aggregate reactivity of recycled concrete aggregates / S. Beauchemin, B. Fournier, J. Duchesne // *Cement and Concrete Research*. 2018. Vol. 104. P. 25–36.

5. Eduardus, A.B. Compressive strength and hydration processes of concrete with recycled aggregates / A.B. Eduardus, Marco Pepe, Enzo Martinelli // *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 56. P. 203–212.

6. Jianzhuang, Xiao. Compressive behavior of recycled aggregate concrete under impact loading / Xiao Jianzhuang, Li Long, Shen Luming, Sun Poon Chi // *Cement and Concrete Research*. 2015. Vol. 71. P. 46–55.

7. Etxeberria, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete / M. Etxeberria, E. Vázquez, A. Marí, M. Barra // *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37. Iss. 5. P. 735–742.

8. ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2016. 11 с.

9. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2011. 11 с.

10. ГОСТ 32495-2013. Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2013. 6 с.

УДК 691-492

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕНОПОЛНИТЕЛЕЙ В ГИПСОВЫХ КОМПОЗИТАХ

*К.С. Петропавловский, Х. Клетти,
В.Б. Петропавловская, Т.Б. Новиченкова*

На рынке строительных материалов возникла потребность в декоративно-отделочных гипсовых материалах, которые используются для объемного декорирования пространства (так называемых 3D-изделиях – блоков, панелей, плитках, камне и др.) [1]. Модификация гипсовых композитов недорогими добавками способствует повышению качества таких изделий и их упрочнению [1, 2]. Но в наших интересах не только повысить прочность материала, но и снизить его вес. В целях повышения эксплуатационных свойств гипсовых изделий исследовалась возможность применения пенополнителя.

Основной задачей исследования являлась оценка технических характеристик получаемых наполненных самоармированных композитов.

В качестве сырьевых компонентов для приготовления гипсового камня использовались гипсовое вяжущее марки Г16 БШ по ГОСТ 125, пенокерамический наполнитель.

Химические свойства пенокерамических сфер (химический состав пенокерамики Kerwood) с размерами гранул 0.04–0.12 мм:

Компонент	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O + K ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	Остальные
%	69.78	8.03	14.58	3.89	1.06	2.66

Состав пенокерамического наполнителя представлен оксидом кремния (75–80 %), а также оксидами металлов – натрия и калия, алюминия, железа и магния. Теплопроводность гранул в зависимости от их размера варьируется в пределах от 0.05 до 0.09 Вт/м · К.

Исследования физико-механических характеристик гипсовых материалов проводились на стандартных образцах-балочках и образцах-цилиндрах в возрасте 7 сут.

Результаты исследований прочности и плотности материалов в зависимости от содержания пенокерамического наполнителя Kerwood представлены на рис. 1, 2. Максимум прочности достигается при содержании 2.5 % керамического наполнителя. Дальнейшее увеличение его содержания способствует снижению механической прочности камня (рис. 1).

Средняя плотность гипсового композита с увеличением количества наполнителя Kerwood монотонно уменьшается во всем исследованном диапазоне (рис. 2).

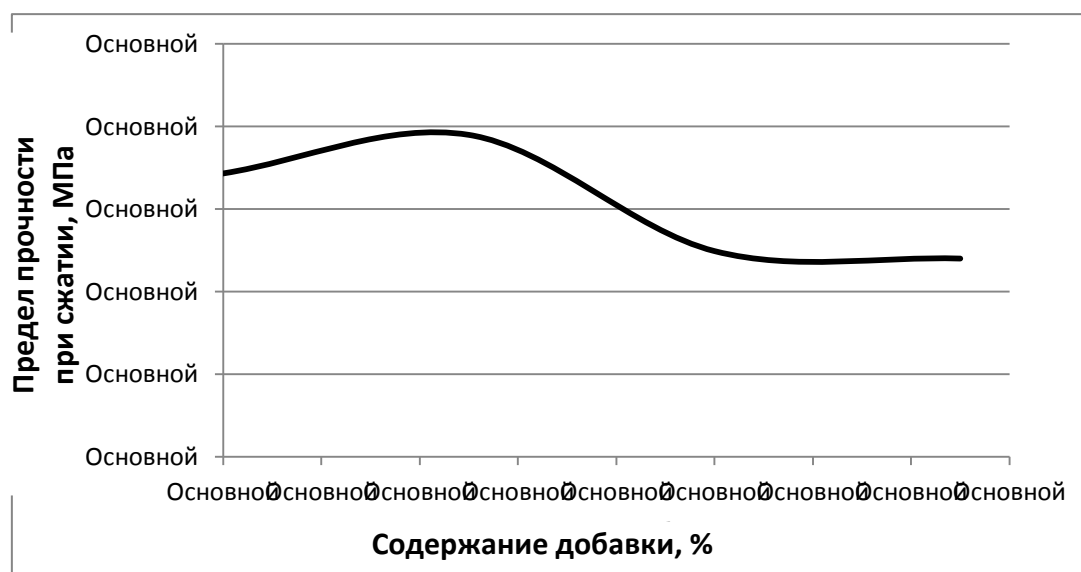


Рис. 1. Зависимость прочности гипсовых композитов от содержания пенонаполнителя

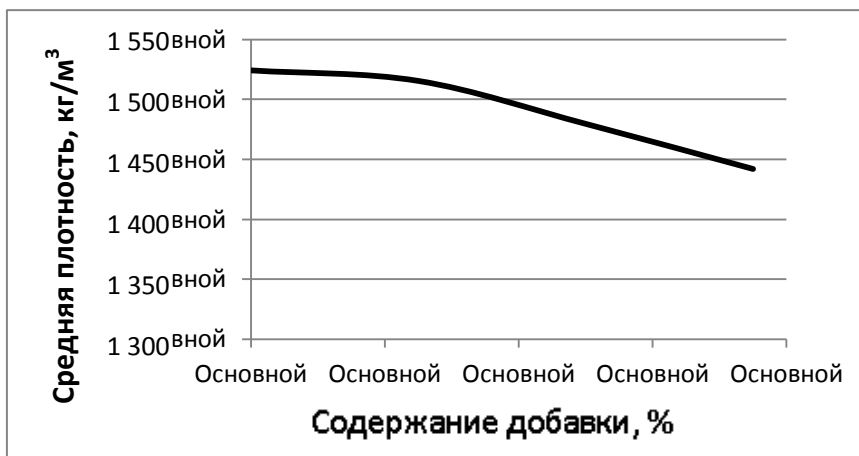


Рис. 2. Зависимость плотности гипсовых композитов от содержания пенонаполнителя

Максимальное значение коэффициента конструктивного качества гипсового композита (рис. 3) соответствует содержанию пенокерамического наполнителя в количестве 2.5 %.

Анализ микроструктуры самоармированного гипсового композита показывает, что формируется уплотненная структура гипсового камня.

Таким образом, проведенными исследованиями установлено, что введение пенонаполнителей в количестве от 2.5 до 7.5 % снижает прочность и плотность получаемого материала.

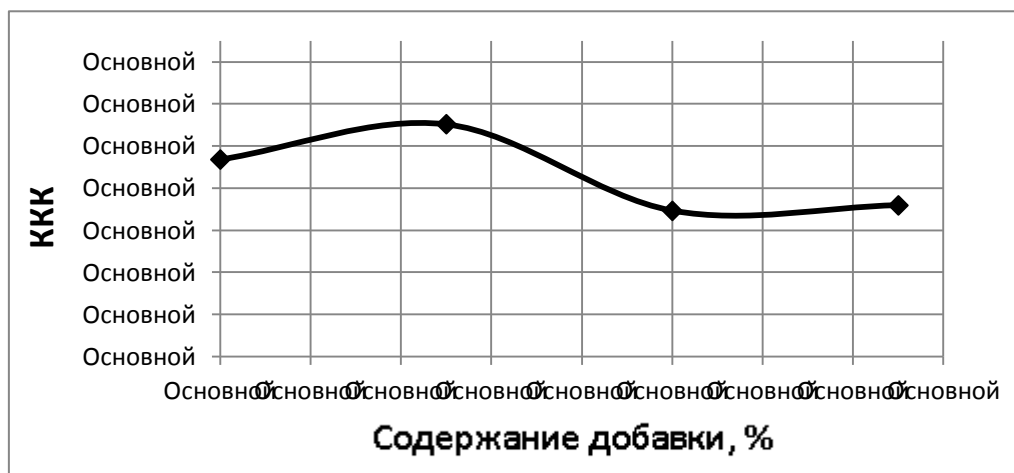


Рис. 3. Коэффициент конструктивного качества гипсового самоармированного композита при использовании пенонаполнителя

Для более эффективного применения пенокерамического наполнителя в количестве 2.5 % (как и в случае с пеностекольным наполнителем), по-видимому, целесообразно использовать добавку в большем количестве, поскольку в данном диапазоне снижение плотности гипсовых композитов на основе пенокерамики составило в среднем 6 %.

Библиографический список

1. Белов, В.В. Модификация структуры и свойств строительных композитов на основе сульфата кальция: монография / В.В. Белов [и др.]. М.: Де Нова, 2012. 196 с.
2. Петропавловская, В.Б. Самоармированные гипсовые композиты: монография / В.Б. Петропавловская [и др.]. М.: Де Нова, 2015. 163 с.
3. Петропавловская, В.Б. Закономерности влияния зернового состава на свойства сырьевых смесей прессованных гипсовых материалов / В.Б. Петропавловская [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 6. С. 4–5.

УДК 666.7-024

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ЯЧЕИСТО-ЗАПОЛНЕННОЙ СТРУКТУРЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

А.Ю. Столбоушкин

ВВЕДЕНИЕ

Среди направлений развития исследований в области строительного материаловедения на ближайшие полвека [1] можно выделить несколько актуальных положений, которые легли в основу научной идеи формирования строительных керамических композитов из техногенного сырья. Это развитие теорий структурообразования строительных композитов и конструирования оптимальных структур строительных материалов, обеспечивающих достижение максимальных физико-технических свойств, а также строительско-технологическая утилизация техногенных отходов.

Как правило, традиционные технологические способы производства строительных керамических материалов из природного сырья малоэффективны при переработке техногенных отходов, а получаемые изделия не обладают необходимыми физико-техническими свойствами [2]. Поэтому актуально развитие теоретических основ формирования рациональной структуры керамических композиционных материалов из техногенного сырья, результатом которого станут новые технологии производства строительных материалов [3].

Основная научная идея автора заключается в агрегации мало-кондиционных неорганических отходов в ядра с последующим образованием вокруг них прочной оболочки из глины и формированием материала, имеющего матричную структуру. В результате при обжиге и спекании оболочки получается прочный керамический материал, связанный воедино матрицей [4].

Для реализации научной идеи были сформулированы граничные условия создания керамических матричных композитов на основе техногенного и природного сырья с учетом существующих технологий керамических строительных материалов:

при выборе сырьевых материалов необходимо ориентироваться на повсеместно распространенное мало- и умереннопластичное природное глинистое сырье полиминерального состава и алюмосиликатные техногенные отходы, запасы которых в настоящее время являются практически неисчерпаемыми [5, 6];

количество корректирующих добавок в составе шихты, обеспечивающих необходимые физико-механические свойства изделий матричной структуры на основе техногенных отходов, должно быть минимальным;

значения технологических параметров формования, сушки и обжига керамических матричных композитов должны находиться в пределах, принятых на большинстве действующих керамических предприятий;

новые технологии производства керамических матричных композитов, сориентированные на использование техногенного сырья, должны обеспечивать экологически безопасные и безвредные при эксплуатации строительные керамические материалы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе при постановке экспериментальной части для подтверждения научной идеи в качестве техногенного и природного сырья применялись следующие материалы:

отходы обогащения железных руд Абагурской обогатительно-агломерационной фабрики «Евразруда» (Кемеровская обл.);

глинистые породы Западной Сибири.

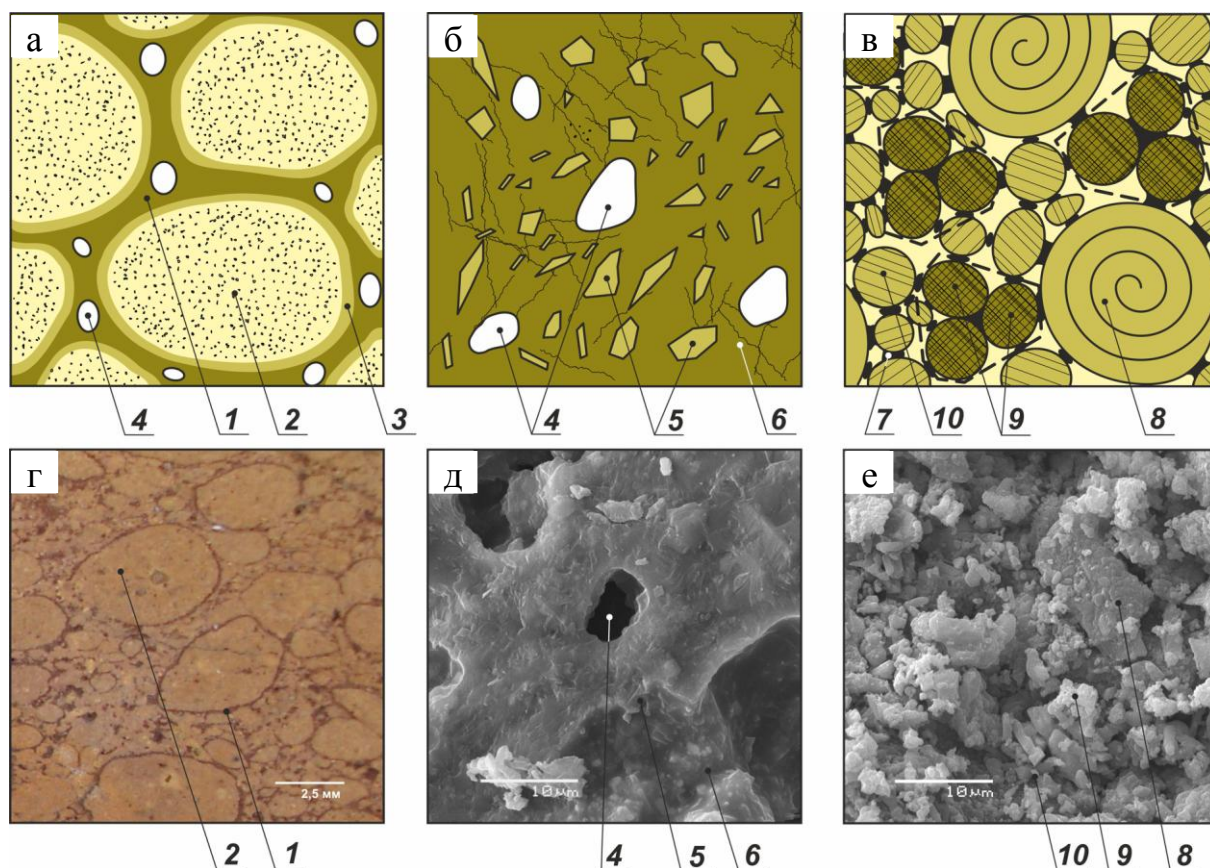
В качестве методов исследований использовались как стандартные, так и прецизионные методы анализа свойств строительных материалов. Исследование структуры и фазового состава проводилось комплексом методов: малоугловой рентгеновской дифрактометрии (с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD-6000); оптической микроскопии (инструменты – геологический микроскоп МИН-8, поляризационный микроскоп Olympus GX-51); электронной микроскопии (приборы – электронный микроскоп JEM-100С, растровый электронный микроскоп JSM-6460LV); термического анализа (инструмент – синхронный термический анализатор Setaram LabSys Evo).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В соответствии с предложенными граничными условиями была разработана схема формирования ячеисто-заполненной структуры строительных керамических матричных композитов (рисунок а–в). В

данной работе экспериментальная апробация проведена на примере шламистых железорудных отходов и умереннопластичного суглинка (рисунок г–е).

Для создания керамического матричного композита с ячеисто-заполненной структурой необходимо, согласно научной идее, провести грануляцию дисперсного техногенного сырья, нанести на поверхность гранул глинистую легкоплавкую компоненту шихты, отпрессовать из полученных гранул сырец, провести сушку и обжиг изделий. Такая технология позволяет формировать внутренний пространственный ячеисто-заполненный каркас (рисунок а, г). При обжиге дисперсионная среда продуцирует жидкую фазу (рисунок б, д), которая внедряется в периферийную зону дисперсной фазы (рисунок в, е) и после кристаллизации образует прочную матричную структуру.



Модели (а–в) и микрофотографии (г–е) структуры керамического матричного композита: макроструктура (а, г), матрица (б, д), ядро (в, е):

- 1 – матрица (наполненное связующее); 2 – ядро (агрегированный наполнитель); 3 – переходный слой между матрицей и ядром; 4 – поры; 5 – наполнитель матрицы (кристаллическая фаза); 6 – связующее матрицы (стекловидная фаза); 7 – пиропластичная фаза; 8 – укрупненные агрегаты частиц; 9 – кластеры; 10 – неагрегированные частицы

Сформированный таким образом керамический матричный композит из техногенного сырья имеет полиструктурное строение [7]. При этом гранулы из отходов выступают в роли заполнителя и образуют систему второго уровня. После прессования и обжига опудривающий слой, сформированный из глины, представляет собой наполненное связующее и образует систему первого уровня.

Условно процесс формирования микроструктуры матрицы в чистом виде вне контактных зон с поверхностью наполнителя и заполнителя керамического композита можно рассматривать как последовательный переход, происходящий под влиянием внешних воздействий, одних видов структур в другие: коагуляционная → конденсационная → кристаллизационная [8].

Коагуляционная структура формируется за счет сил межмолекулярного взаимодействия между частицами глины через прослойки жидкой среды, выдавливаемой из гранул влажного заполнителя (при этом влажность составляет порядка 9–12 %) в поверхностный опудривающий слой при прессовании.

В процессе сушки после удаления жидкой фазы образуется конденсационная структура при непосредственном взаимодействии частиц под влиянием ковалентных или ионных связей. В результате обжига стеновой керамики формируется кристаллизационная структура матрицы через кристаллизацию твердой минеральной фазы из расплава с последующим срастанием кристаллов в единую прочную систему. Сформированные таким образом внутренние поверхности раздела керамического матричного композита из техногенного сырья должны сохранять стабильность физико-технических показателей во время всего периода эксплуатации материала [9].

Петрографические и СЭМ-исследования керамического черепка на основе гранулированных шламистых отходов обогащения железных руд выявили в структуре материала характерные границы раздела фаз по поверхности контакта гранул (см. рисунок г). Отмечаются важные различия микроструктуры матрицы и ядра. Матрица имеет микропорфировую структуру с мелкими порфировыми вкраплениями зерен минералов. Наблюдаются участки микропойки-литовой структуры с беспорядочными включениями мелких минеральных частиц (менее 1 мкм), лишенных кристаллографических очертаний и имеющих округлую форму (см. рисунок д). Напротив, структура ядер – агломератовая с зернами минералов в виде кристаллических обломков с острыми или оплавленными углами. Промежутки и пустоты между зернами частично или полностью заполнены минеральным веществом в виде щетки мелких кристаллов, расположенных на стенках пустот, формируя друзовую микротекстуру в гранулах (см. рисунок е).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате лабораторных и опытно-заводских испытаний [10] установлено, что прочность строительной керамики с матричной структурой из непластичных шламов обогащения железных руд (70–80 % по массе) и суглинка (20–30 % по массе) при суммарном содержании глинистых 5–6 % по массе составляет 15–24 МПа после обжига при 1 050 °С, что превышает аддитивную прочность керамического материала после обжига смеси компонентов в 1.5–2 раза.

Разработанная модель формирования ячеистозаполненной структуры строительных керамических матричных композитов позволяет использовать в качестве основного сырья малоприспособленные в технологии пластического формования материалы, обеспечивает при этом достижение максимальных физико-технических свойств, а также строительнотехнологическую утилизацию техногенных отходов.

Результаты исследования получены в рамках выполнения госзадания Минобрнауки РФ, шифр проекта № 7.7285.2017/8.9 «Фундаментальные исследования в области строительных керамических композиционных материалов с матричной структурой на основе техногенного и природного сырья».

Библиографический список

1. Чернышов, Е.М. К проблеме развития исследований и разработок в области материаловедения и высоких строительных технологий: основные акценты / Е.М. Чернышов // Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии: материалы XV Академических чтений РААСН. В 2 т. Т. 1. Казань: КазГАСУ, 2010. С. 8–9.
2. Верещагин, В.И. Моделирование структуры и оценка прочности строительной керамики из грубозернистых масс / В.И. Верещагин, А.Д. Шильцина, Ю.В. Селиванов // Строительные материалы. 2007. № 6. С. 65–68.
3. Столбоушкин, А.Ю. Теоретические основы формирования керамических матричных композитов на основе техногенного и природного сырья / А.Ю. Столбоушкин // Строительные материалы. 2011. № 2. С. 10–13.
4. Столбоушкин, А.Ю. Керамические стеновые материалы матричной структуры на основе неспекающегося малопластичного техногенного и природного сырья / А.Ю. Столбоушкин [и др.] // Строительные материалы. 2016. № 08. С. 19–23.
5. Абдрахимов, В.З. Экологические, теоретические и практические аспекты использования алюмосодержащих отходов в производстве керамических материалов различного назначения без применения природного традиционного сырья / В.З. Абдрахимов [и др.] // Экология и промышленность России. 2013. № 5. С. 28–32.

6. Бурученко, А.Е. Возможности использования вторичного сырья для получения строительной керамики и ситаллов / А.Е. Бурученко // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2013. Вып. № 3 (18). С. 7–14.

7. Хрулев, В.М. Состав и структура композиционных материалов / В.М. Хрулев, Ж.Т. Тентиев, В.М. Курдюмова. Бишкек: Полиглот, 1997. 124 с.

8. Сайбулатов, С.Ж. Особенности формирования коагуляционной структуры в системе «углеотходы – вода» / С.Ж. Сайбулатов [и др.] // Проектирование, строительство и эксплуатация транспортно-коммуникационных сооружений: межвузовский сборник научных трудов. Алматы: КазАТК, 2000. Вып. 9. С. 66–69.

9. Портной, К.И. Структура и свойства композиционных материалов / К.И. Портной [и др.]. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.

10. Столбоушкин, А.Ю. Исследование эксплуатационных свойств керамического кирпича матричной структуры / А.Ю. Столбоушкин [и др.] // Строительные материалы. 2017. № 9. С. 9–13.

УДК 539.3: 519.6.502

ОПИСАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫХ ОРТОТРОПНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*А.А. Трещев, Ю.А. Завьялова, М.А. Лапшина,
Ю.А. Монастырев, В.Д. Чибрикина*

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве и аппаратостроении все чаще стали применяют легкие анизотропные материалы, обладающие повышенной прочностью. Наиболее распространенный класс анизотропии этих материалов – ортотропный класс. Даже такой «древний» материал, как древесина, является ортотропным телом с цилиндрической анизотропией. Что уж говорить о современных стекло-, боро-, графитопластиках и поликарбонате. При одновременном повышении прочности усложняется и структура данных материалов, которая зачастую приводит к функциональной связи жесткости и прочности от качественной картины НДС, что не вписывается в рамки классической теории прочности и материаловедения. Данный факт однозначно не положен в единую и общепризнанную деформационную и прочностную теорию, применимую к этим материалам и свободную от грубых недостатков. Здесь рассматривается вариант теории, который может послужить долгие годы проектировщикам и материаловедам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными методами исследования являются распространенные классические теории деформирования и прочности, математические воззрения на векторные пространства применительно к конструкционным материалам. Материалами для исследований послужили графито-композиты, стеклопластики и полимерные композиты, применяемые в строительстве и в других областях техники.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах [1–3] на основе анализа многочисленных экспериментальных данных по деформированию анизотропных разносопротивляющихся сред [4–8] были предложены нелинейные потенциальные соотношения между деформациями и напряжениями для ортотропных материалов в следующей форме:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \dots, \quad (1)$$

где $W = W(\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}, \tau_{12}\tau_{21}, \tau_{23}\tau_{32}, \tau_{31}\tau_{13}, \tau_{12}\tau_{23}\tau_{31})$, W_n – степенной полином порядка $n+1$, представленный в пространстве напряжений.

Константы разложения (1) представляются функциями от деформационных свойств материала, определяемых видом НДС и подлежащих вычислению по результатам обработки результатов испытаний при различных нагружениях. Ограничиваясь уровнем квазилинейной аппроксимации, получим

$$W_1 = A_1\sigma_{11}^2 + A_2\sigma_{22}^2 + A_3\sigma_{33}^2 + A_4\sigma_{11}\sigma_{22} + A_5\sigma_{22}\sigma_{33} + A_6\sigma_{33}\sigma_{11} + A_7\tau_{12}\tau_{21} + A_8\tau_{23}\tau_{32} + A_9\tau_{31}\tau_{13}. \quad (2)$$

Количество компонентов представления (1) при увеличении n серьезно возрастает. Если $n=2$, то соответствующие составляющие объединяются выражением

$$W_2 = B_1\sigma_{11}^3 + B_2\sigma_{22}^3 + B_3\sigma_{33}^3 + B_4\sigma_{11}^2\sigma_{22} + B_5\sigma_{11}\sigma_{22}^2 + B_6\sigma_{22}^2\sigma_{33} + B_7\sigma_{22}\sigma_{33}^2 + B_8\sigma_{33}^2\sigma_{11} + B_9\sigma_{33}\sigma_{11}^2 + B_{10}\sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33} + B_{11}\sigma_{11}^2\tau_{12}^2 + B_{12}\sigma_{11}\tau_{23}^2 + B_{13}\sigma_{11}\tau_{31}^2 + B_{14}\sigma_{22}\tau_{12}^2 + B_{15}\sigma_{22}\tau_{23}^2 + B_{16}\sigma_{22}\tau_{31}^2 + B_{17}\sigma_{33}\tau_{12}^2 + B_{18}\sigma_{33}\tau_{23}^2 + B_{19}\sigma_{33}\tau_{31}^2 + B_{20}\tau_{12}\tau_{13}\tau_{23}. \quad (3)$$

Если $n = 3$, то общее содержание компонентов разложения (1) составит 42.

Авторы работ [1–3] ограничили разложение (1) рамками $n = 2$. При этом в разложениях (2) и (3) для разносопротивляющихся материалов параметры A_k и B_k являются функциями, определяющими вид напряженного состояния, и зависят от комбинаций нормированных напряжений [9–11]:

$$\alpha_{ij} = \sigma_{ij} / S; \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (4)$$

где $S = \sqrt{\sigma_{ij}\sigma_{ij}} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + \sigma_{33}^2 + 2\tau_{12}^2 + 2\tau_{23}^2 + 2\tau_{13}^2}$.

При этом справедливо условие нормировки [1–3, 9–11]:

$$\alpha_{ij}\alpha_{ij} = \alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2\alpha_{12}^2 + 2\alpha_{23}^2 + 2\alpha_{13}^2 = 1. \quad (5)$$

Параметры A_k и B_k являются функциями от нормированных напряжений: $A_k(\alpha_{ij})$; $B_k(\alpha_{ij})$.

Соотношения, объединяющие параметры деформаций с напряжениями с учетом ортотропии и нелинейности материалов, представленные в главных материальных осях, соответствующие потенциалу (см. формулы (1)–(3)) можно получить, применив правила Кастильяно:

$$e_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \sigma_{ij}}; \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (6)$$

Из анализа предложенного нелинейного потенциала $w = w_1 + w_2$ видно, что для определения всех констант необходимо провести достаточно большой объем экспериментальных исследований, включая опыты, реализующие комплексы сложных напряженных состояний, например различных двухосных, трехосных растяжений-сжатий и даже опыты по одновременному сдвигу в трех главных взаимно ортогональных плоскостях, а это в настоящее время весьма проблематично. Современное строительство и другие отрасли промышленности все чаще прибегают к использованию конструкционных материалов, относящихся к классу ортотропных с деформационными свойствами, отличающимися от классических представлений их деформирования [4–8]. В связи с этим для сооружений, деталей машин и аппаратов, выполненных из подобных материалов, необходимо выполнять деформационные и прочностные расчеты с максимально возможной точностью. Данная ситуация позволяет на современном этапе ограничить разложение (1) квазиквадратичным представлением (2), заменив при этом функции A_7 , A_8 , A_9 константами [9, 10], что поясним ниже. В этом случае потенциал деформаций принимает вид

$$\begin{aligned} W_1 = & 0,5(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}\alpha_{11})\sigma_{11}^2 + 0,5(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22})\sigma_{22}^2 + 0,5(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33})\sigma_{33}^2 + \\ & + [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11}\sigma_{22} + [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22}\sigma_{33} + \\ & + [A_{3311} + \tilde{A}_{3311}(\alpha_{33} + \alpha_{11})]\sigma_{33}\sigma_{11} + A_{1212}\tau_{12}^2 + A_{2323}\tau_{23}^2 + A_{3131}\tau_{31}^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Продифференцировав потенциал (7) по формулам Кастильяно (6), получим следующие квазилинейные уравнения состояния, описывающие деформирование ортотропных материалов класса разносопротивляющихся:

$$\begin{aligned} e_{11} = & \{(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}\alpha_{11}) + 0,5\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}[\alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)] - \\ & - 0,5(\tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) + (1 - \alpha_{11})[\tilde{A}_{1122}\alpha_{22}(\alpha_{22}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \\ & + \tilde{A}_{1133}\alpha_{33}] - \tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33})\}\sigma_{11} + [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{22} + [A_{1133} + \tilde{A}_{1133}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\sigma_{33}; \\ e_{22} = & [A_{1122} + \tilde{A}_{1122}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\sigma_{11} + \{(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}) + 0,5\tilde{A}_{2222}\alpha_{22}[\alpha_{11}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)] - \\ & - 0,5(\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) + (1 - \alpha_{22})[\tilde{A}_{2233}\alpha_{33}(\alpha_{11}^2 + \alpha_{33}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \tilde{A}_{1133}\alpha_{33}] - \\ & - \tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})\}\sigma_{22} + [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{33}; \\ e_{33} = & [A_{1133} + \tilde{A}_{1133}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\sigma_{11} + [A_{2233} + \tilde{A}_{2233}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\sigma_{22} + \{(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}) + \\ & + 0,5\tilde{A}_{3333}\alpha_{33}[\alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)] - 0,5(\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (1 - \alpha_{33})[\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}(\alpha_{11}^2 + \alpha_{22}^2 + 2(\alpha_{12}^2 + \alpha_{23}^2 + \alpha_{31}^2)) + \tilde{A}_{2233}\alpha_{22}] - \tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22})\}\sigma_{33}; \\
\gamma_{12} & = [A_{1212} - (\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) - 2\tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) - \\
& \quad - 2\tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33}) - 2\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33})]\tau_{12}; \\
\gamma_{23} & = [A_{2323} - (\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) - 2\tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33}) - \\
& \quad - 2\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33}) - 2\tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22})]\tau_{23}; \\
\gamma_{31} & = [A_{1313} - (\tilde{A}_{1111}\alpha_{11}^3 + \tilde{A}_{2222}\alpha_{22}^3 + \tilde{A}_{3333}\alpha_{33}^3) - 2\tilde{A}_{1133}\alpha_{11}\alpha_{33}(\alpha_{11} + \alpha_{33}) - \\
& \quad - 2\tilde{A}_{1122}\alpha_{11}\alpha_{22}(\alpha_{11} + \alpha_{22}) - 2\tilde{A}_{2233}\alpha_{22}\alpha_{33}(\alpha_{22} + \alpha_{33})]\tau_{31}.
\end{aligned}$$

Очевидно, что коэффициенты представления (2) можно определить из базы экспериментальных данных по одноосному растяжению и одноосному сжатию образцов ортотропного материала, вырезанных в направлениях главных материальных осей. Эти данные позволяют получить модули деформации (секущие модули упругости) E_k^{\pm} и коэффициенты поперечной деформации ν_{ij}^{\pm} , а также эксперименты по сдвигу в главных плоскостях анизотропии, из которых устанавливаются модули сдвига во взаимно ортогональных главных плоскостях анизотропии G_{ij} .

Из экспериментов на одноосное растяжение и одноосное сжатие вдоль главной оси анизотропии x_1 получим:

$$\begin{aligned}
1/E_1^+ & = A_{1111} + \tilde{A}_{1111}; \quad -\nu_{21}^+ = (A_{1122} + \tilde{A}_{1122})/(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}); \quad -\nu_{31}^+ = (A_{1133} + \tilde{A}_{1133})/(A_{1111} + \tilde{A}_{1111}); \\
1/E_1^- & = A_{1111} - \tilde{A}_{1111}; \quad -\nu_{21}^- = (A_{1122} - \tilde{A}_{1122})/(A_{1111} - \tilde{A}_{1111}); \quad -\nu_{31}^- = (A_{1133} - \tilde{A}_{1133})/(A_{1111} - \tilde{A}_{1111}); \\
& \text{вдоль главной оси анизотропии } x_2:
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
1/E_2^+ & = A_{2222} + \tilde{A}_{2222}; \quad -\nu_{12}^+ = (A_{1122} + \tilde{A}_{1122})/(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}); \quad -\nu_{32}^+ = (A_{2233} + \tilde{A}_{2233})/(A_{2222} + \tilde{A}_{2222}); \\
1/E_2^- & = A_{2222} - \tilde{A}_{2222}; \quad -\nu_{12}^- = (A_{1122} - \tilde{A}_{1122})/(A_{2222} - \tilde{A}_{2222}); \quad -\nu_{32}^- = (A_{2233} - \tilde{A}_{2233})/(A_{2222} - \tilde{A}_{2222}); \\
& \text{вдоль главной оси анизотропии } x_3:
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
1/E_3^+ & = A_{3333} + \tilde{A}_{3333}; \quad -\nu_{13}^+ = (A_{1133} + \tilde{A}_{1133})/(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}); \quad -\nu_{23}^+ = (A_{2233} + \tilde{A}_{2233})/(A_{3333} + \tilde{A}_{3333}); \\
1/E_3^- & = A_{3333} - \tilde{A}_{3333}; \quad -\nu_{13}^- = (A_{1133} - \tilde{A}_{1133})/(A_{3333} - \tilde{A}_{3333}); \quad -\nu_{23}^- = (A_{2233} - \tilde{A}_{2233})/(A_{3333} - \tilde{A}_{3333}).
\end{aligned}$$

Из экспериментов на чистый сдвиг в соответствующих главных плоскостях получим:

$$1/G_{12} = A_{1212}; \quad 1/G_{23} = A_{2323}; \quad 1/G_{13} = A_{1313}.$$

Определим константы потенциала через технические постоянные следующим образом:

$$\begin{aligned}
A_{kkkk} & = (1/E_k^+ + 1/E_k^-)/2; \quad \tilde{A}_{kkkk} = (1/E_k^+ - 1/E_k^-)/2; \quad A_{ijij} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ + \nu_{ij}^-/E_j^-)/2; \\
\tilde{A}_{ijij} & = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ - \nu_{ij}^-/E_j^-)/2; \quad A_{ijij} = 1/G_{ij}; \quad \nu_{ij}^+/E_j^+ = \nu_{ji}^+/E_i^+; \quad \nu_{ij}^-/E_j^- = \nu_{ji}^-/E_i^-, \quad i, j, k = 1, 2, 3.
\end{aligned}$$

При определении констант потенциала необходимо проводить проверку энергетической непротиворечивости в соответствии с требованиями постулата Дуккера [9]:

$$\delta e_{ij} \delta \sigma_{ij} = \frac{\partial^2 W_1}{\partial \sigma_{km} \partial \sigma_{ij}} \delta \sigma_{km} \delta \sigma_{ij} \geq 0. \quad (8)$$

Приведем механические характеристики материалов, имеющиеся в литературе. Эти данные представим в таблице, где представлены константы материалов E_k^\pm , ν_{ij}^\pm и G_{ij} .

Механические характеристики материалов

Константы	П32-57 [12]	П36-50 [12]	П41-42 [12]	Графит АТJ-S [13]	Стеклопластик [14]	Стеклопластик [14]
E_1^+	12.75 ГПа	10.3 ГПа	8.09 ГПа	11.85 ГПа	140 ГПа	60 ГПа
E_1^-	14.03 ГПа	11.77 ГПа	10.79 ГПа	10.48 ГПа	70 ГПа	20 ГПа
E_2^+	16.425 ГПа	17.6 ГПа	16.09 ГПа	11.85 ГПа	280 ГПа	30 ГПа
E_2^-	20.60 ГПа	18.54 ГПа	16.97 ГПа	10.48 ГПа	140 ГПа	15 ГПа
E_3^+	–	–	–	9.45 ГПа	–	–
E_3^-	–	8.34 ГПа	–	7.95 ГПа	–	–
ν_{12}^+	0.176	0.188	0.28	0.1	0.2	–
ν_{12}^-	–	–	–	0.09	0.3	–
ν_{13}^+	0.126	0.115	0.1	–	–	–
ν_{13}^-	–	–	–	–	–	–
ν_{32}^+	–	–	–	–	–	–
ν_{32}^-	–	–	–	–	–	–
E_{12}^+	–	–	–	–	170 ГПа	–
E_{12}^-	–	–	–	–	875 ГПа	–
G_{12}	3.98 ГПа	3.14 ГПа	–	–	–	–
G_{13}	3.28 ГПа	3.49 ГПа	4.02 ГПа	–	–	–
G_{23}	2.63 ГПа	2.55 ГПа	2.45 ГПа	–	–	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные уравнения связи деформаций и напряжений с учетом получаемых из экспериментов констант для ортотропных композитов [4–8, 12–14] удовлетворяют ограничениям (8) и обобщают большинство известных моделей деформирования ортотропных материалов.

Библиографический список

1. Трещев, А.А. Потенциальная зависимость между деформациями и напряжениями для ортотропных физически нелинейных материалов / А.А. Трещев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2017. № 4-1 (324). С. 71–74.
2. Трещев, А.А. Удельная дополнительная работа деформирования ортотропных физически нелинейных материалов / А.А. Трещев, Ю.А. Монастырев, В.Д. Чибрикина // *Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 13-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики*. В 2 т. Т. 2. Тула: ТулГУ, 2017. С. 208–212.

3. Трещев, А.А. Нелинейные определяющие соотношения для ортотропных разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещев // Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и промышленности: сборник материалов XVIII Международной научно-технической конференции. Тула: ТулГУ, 2017. С. 180–184.

4. Schmueser, D.W. Nonlinear Stress-Strain and Strength Response of Axisymmetric Bimodulus Composite Material Shells / D.W. Schmueser // AIAA Journal. 1983. Vol. 21. № 12. P. 1742–1747.

5. Reddy, L.N. On the Behavior of Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / L.N. Reddy, C.W. Bert // ZAMM. 1982. Vol. 62. № 6. P. 213–219.

6. Jones, R.M. A Nonsymmetric Compliance Matrix Approach to Nonlinear Multimodulus Ortotropic Materials / R.M. Jones // AIAA Journal. 1977. Vol. 15. № 10. P. 1436–1443.

7. Jones, R.M. Modeling Nonlinear Deformation of Carbon-Carbon Composite Material / R.M. Jones // AIAA Journal. 1980. Vol. 18. № 8. P. 995–1001.

8. Jones, R.M. Bucling of Stiffened Multilayered Circular Shells with Different Ortotropic Moduli in Tension and Compression / R.M. Jones // AIAA Journal. 1971. Vol. 9. № 5. P. 917–923.

9. Трещев, А.А. Теория деформирования и прочности материалов с изначальной или наведенной чувствительностью к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения / А.А. Трещев. М. – Тула: РААСН; ТулГУ, 2016. 328 с.

10. Трещев, А.А. Анизотропные пластины и оболочки из разносопротивляющихся материалов / А.А. Трещев. М. – Тула: РААСН; ТулГУ, 2007. 160 с.

11. Трещев, А.А. Определяющие соотношения для нелинейных анизотропных материалов, чувствительных к виду напряженного состояния / А.А. Трещев, Д.А. Ромашин // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 4. С. 1740–1742.

12. Розе, А.В. Трехармированные тканые материалы / А.В. Розе, И.Г. Жигун, М.Н. Душин // Механика полимеров. 1970. № 3. С. 471–476.

13. Jones, R.M. Theoretical-experimental correlation of material models for non-linear deformation of graphite / R.M. Jones, D.A.R. Nelson // AIAA Journal. 1976. Vol. 14. № 10. P. 1427–1435.

14. Jones, R.M. Stress-Strain Relations for Materials with Different Moduli in Tension and Compression / R.M. Jones // AIAA Journal. 1977. Vol. 15. № 1. P. 16–25.

УДК 624.131.5

**К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ
ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ
В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ СТРОИТЕЛЬСТВА**

В.И. Трофимов, А.С. Джабаров, В.Ю. Леушкин, А.А. Некрасов

ВВЕДЕНИЕ

В связи с постоянно возрастающей грузонапряженностью на дорогах и расширяющейся их сетью встает вопрос о повышении надежности дорожного покрытия (рис. 1).



Рис. 1. Транспортный поток из тяжелогруженных автомобилей на Севере

В настоящее время используются различные методы и технологические приемы с целью повышения несущей способности оснований дорог: устройство на болотах лежневого настила, расстилка на поверхности геополотнищ или геосеток, укладка замковых облегченных стальных плит или композитных замковых плит, железобетонных дорожных плит и др.

Геосинтетические материалы (геополотнища, геосетки) применяются в сложных инженерно-геологических условиях довольно давно. В последнее время в дорожном строительстве все шире начинают использовать мобильные композитные плиты (рис. 2, 3). Одними из таких эффективных плит являются плиты типа МДП «МОБИСТЕК», которые являются композитными изделиями, состоящими из стеклопластика и наполнителя. Эти мобильные сборно-разборные дорожные покрытия рекомендуется применять вместо лежневого настила, который широко используется в сильно обводненных районах, в частности в Западной

Сибири при обустройстве и разработке нефтегазовых месторождений. Повышенная прочность и гибкость композитных плит позволяет их монтировать при минимальной подготовке поверхности грунта. Кроме того, морозо- и жаростойкость обеспечивает возможность применения этих покрытий в любых климатических условиях [1].



Рис. 2. Временное дорожное полотно из композитных замковых плит типа МДП «МОБИСТЕК»



Рис. 3. Обустройство площадки из композитных замковых плит типа МДП «МОБИСТЕК»

В то же время большая часть дорожного покрытия (особенно на Севере) выполняется из преднапряженных железобетонных плит. Однако суровые климатические условия и повсеместное распространение структурно неустойчивых пылеватых грунтов, на которые приходится укладывать плиты, приводят к их преждевременному разрушению. Для предотвращения этого негативного процесса используют армирующие прослойки в основании плит из геополимеров (сетки, полотнища). Хотя образование трещин при применении армирующих прослоек полностью не прекращается (не останавливается), начало процесса трещинообразования значительно отодвигается, что удлиняет срок службы покрытия из плит в несколько раз [2, 3, 4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С учетом выявленных положительных свойств у мобильных композитных дорожных плит (высокой несущей способности и хорошей деформативности) была предложена новая конструкция дорожной плиты из двух слоев: верхнего бетонного и нижнего из готовой композитной плиты (рис. 4).

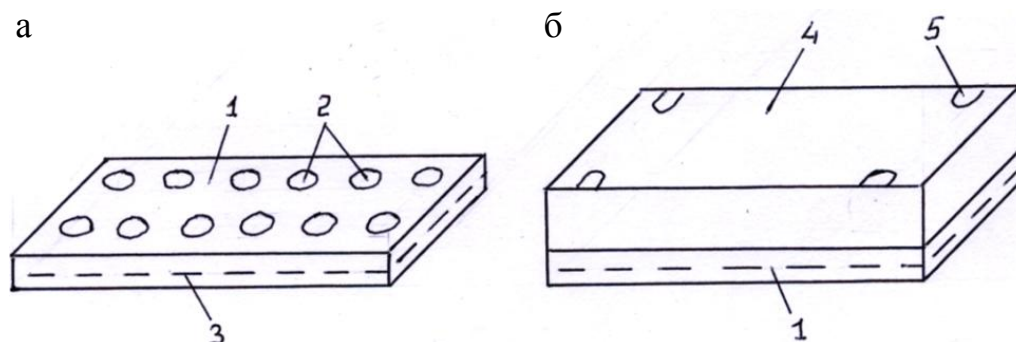


Рис. 4. Конструкция комбинированной двухслойной дорожной плиты:

а – композитная плита; б – готовая дорожная плита;

1 – композитная плита; 2 – отверстия под бетонные анкеры-бобышки;

3 – сетка (полотнище); 4 – бетонный слой комбинированной плиты;

5 – подъемные петли

Было высказано предположение, что такая конструкция дорожной комбинированной плиты позволит снизить ее массу и повысить несущую способность, что даст возможность отказаться в будущем от использования преднапряженных дорожных плит.

Для проверки выдвинутой гипотезы были выполнены модельные испытания. В качестве модели дорожной плиты была принята стандартная бетонная балочка $40 \times 40 \times 160$ мм. Были изготовлены чисто бетонные балочки и комбинированные двухслойные балочки. В качестве нижнего композитного слоя использовались заранее изготовленные композитные пластины толщиной 3 мм с различным диаметром отверстий – анкеров (рис. 5).



Рис. 5. Композитные образцы –
пластины с различной площадью анкерных отверстий

Пластины изготавливались из стеклоткани, пропитанной эпоксидной смолой. Отверстия в пластинах предназначены для их соединения с верхним бетонным слоем. В процессе формования отверстия заполняются бетонной смесью, образуют при твердении анкеры-бобышки, за счет которых происходит прочное соединение слоев плиты.

Аналогом такого соединения является трехслойная наружная стеновая панель, где внешние несущие слои соединяются гибкими связями или бетонными бобышками [5].

Бетонные и комбинированные балочки изготавливались из мелкозернистого бетона в виде цементно-песчаной смеси в соотношении 1:3. Песок использовался карьерный, средней крупности, вяжущее – портландцемент М500. Водоцементное отношение – 0.5. Балочки формировались на виброплощадке с вертикально направленными колебаниями с последующей тепловой обработкой в пропарочной камере. При производстве серии комбинированных балочек были использованы приготовленные композитные пластины.

Испытания образцов балочек выполнялись на испытательной машине МИИ-100.

Из рис. 6а видно, что наблюдается явно хрупкое разрушение обычной однослойной бетонной балочки. Для комбинированных балочек такого явного хрупкого разрушения не наблюдается (рис. 6б).

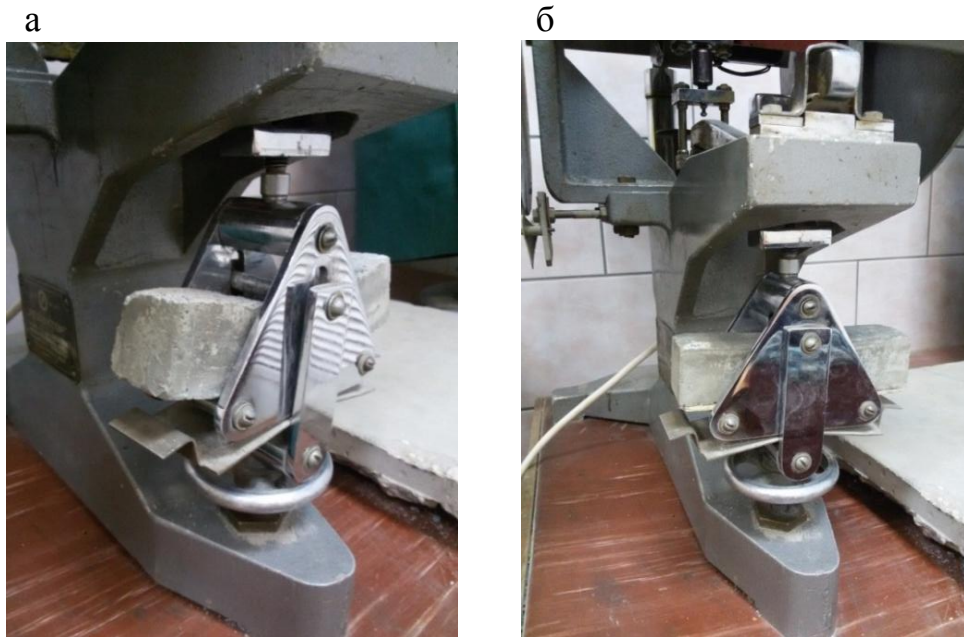


Рис. 6. Вид образцов в машине МИИ-100 после разрушения:
а – обычная бетонная; б – комбинированная балочка

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При испытании был зафиксирован положительный эффект, связанный с особым процессом разрушения комбинированных балочек. Балочки, которые не были усилены композитной пластиной, разрушались полностью с характерным треском, а комбинированные балочки оставались визуально целыми с трещиной разлома посередине и без явного хрупкого разрушения (рис. 7).



Рис. 7. Вид комбинированной балочки после разрушения

По результатам испытаний были построены гистограммы зависимости прочности при изгибе $R_{изг}$ и времени нагружения (деформирования) t от площади анкеровки S (рис. 8, 9). Из них видно, что максимальная прочность при изгибе, равная 5.82 МПа, соответствует

комбинированной балочке с минимальной площадью анкеровки (2.55 см^2), что на 27 % больше прочности неусиленной балочки. При этом время нагружения-деформирования до достижения предельного состояния у комбинированных балочек было больше на 17–35 % относительно неусиленной балочки, что косвенно говорит о лучших их деформативных свойствах и, как следствие, о меньшей степени хрупкости.

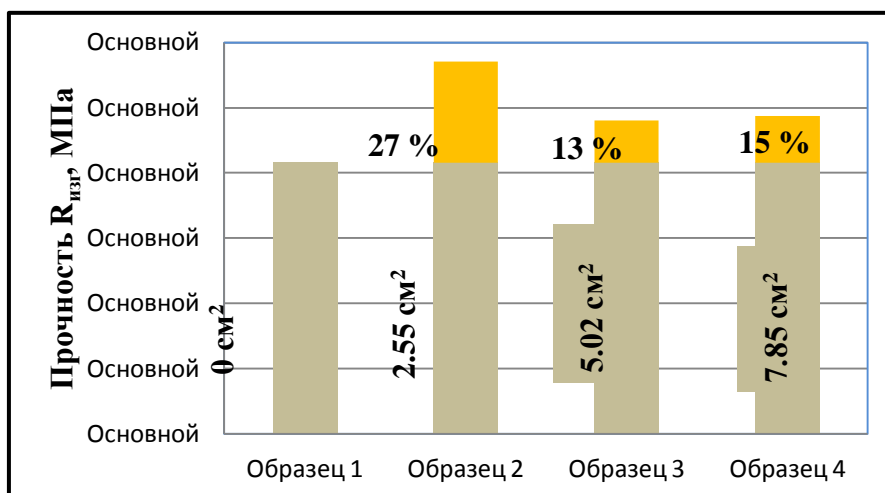


Рис. 8. Зависимость прочности на изгиб от площади анкеровки

Разрабатываемые комбинированные дорожные плиты предназначены в основном для работы в сложных природно-климатических условиях строительства, а также для обустройства строительных площадок, ремонтных работ и др.

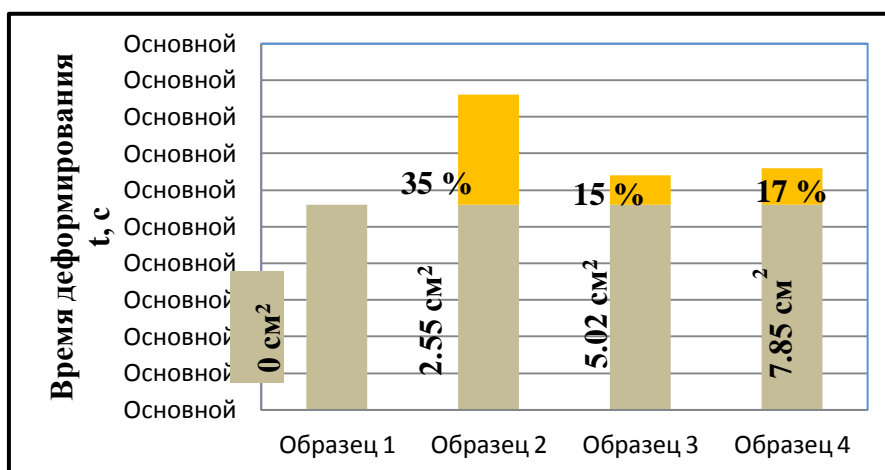


Рис. 9. Зависимость времени деформирования от площади анкеровки

Внедрение в практику строительства новой конструкции комбинированной дорожной плиты позволит:

снизить массу плиты, что приведет к экономии бетона и снижению нагрузки на основание на 10–15 %;

предотвратить хрупкое разрушение плиты и тем самым снизить риск возникновения аварийных ситуаций;

повысить несущую способность плиты за счет повышенной сопротивляемости изгибным деформациям нижнего пояса плиты;

повысить коррозионную стойкость дорожной плиты за счет исключения прямого контакта бетона с агрессивной грунтовой средой;

использовать общепринятую технологию формования дорожных плит.

Библиографический список

1. Смердов, М.Н. Исследование несущей способности железобетонных конструкций горнотехнических зданий и сооружений, усиленных композиционными материалами, с учетом температурных факторов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / Смердов Михаил Николаевич. Екатеринбург, 2016. 16 с.

2. Ушаков, В.В. Оценка влияния конструктивных решений на трещиностойкость асфальтобетонных слоев усиления цементобетонных покрытий автомобильных дорог / В.В. Ушаков, В.С. Агеев // Автомобильные дороги. 2007. № 1. С. 89–91.

3. Ушаков, В.В. Усиление цементобетонных покрытий автомобильных дорог / В.В. Ушаков, В.С. Агеев // Транспортное строительство. 2007. № 2. С. 29–30.

4. Свод правил СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / Правила проектирования. М., 2015. 51 с.

5. Баженов, Ю.М. Технология бетона, строительных изделий и конструкций: учебник для вузов / Ю.М. Баженов [и др.]. М.: АСВ, 2008. 350 с.

УДК 666.7-026.613

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЦВЕТОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕКОРАТИВНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

О.А. Фомина, А.Ю. Столбоушкин, П.С. Зенков

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия в строительном комплексе России наметились новые подходы в организации гражданских и промышленных объектов. Это обусловлено рядом причин, вызванных инновациями в архитектуре, новыми строительными технологиями и материалами, массовой цифровизацией всех сфер человеческой деятельности (и даже созданием дополненной реальности) и, наконец, глобальными экономическими и политическими изменениями в обществе.

Одной из особенностей современного строительства зданий является возросшая доля применения мелкоштучных стеновых материалов. Устойчивый спрос на керамические изделия вызван ростом индивидуального жилищного строительства и возведением зданий нетиповой планировки. Соответственно, возрастают потребности в выпуске высококачественного облицовочного и декоративного кирпича, несмотря на снижение объемов ввода зданий, начавшееся в конце 2015 г. [1, 2].

Для характеристики декоративных свойств стеновой керамики очень важна объективная оценка ее цвета. Цветовое восприятие материала глазом человека, с точки зрения строительной физики, зависит от поглощения его поверхностью части спектра падающего на нее видимого белого света (электромагнитные колебания с длиной волны в диапазоне 380–780 нм). Таким образом, на цвет керамических изделий будут оказывать влияние множество объективных и субъективных факторов, таких как условия освещения, вид и количество источников света, их амплитуда и спектральная характеристика, оптически активные центры на керамической поверхности и др.

С середины XX в. в строительной практике для идентификации цвета и подбора колеров при проведении архитектурных и отделочных работ широко применялся атлас архитектурных расцветок, состоявший из 96 выкрасок, приготовленных в основном из двух видов пигментов [3]. Однако, несмотря на широкую гамму архитектурных колеров, принятая в его основе номерная палитра расцветок с множеством близких друг к другу оттенков практически не нашла применение при оценке цветовой характеристики декоративных керамических материалов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе при определении цветовой характеристики использовались керамические образцы-цилиндры двух цветов, полученные по технологии полусухого прессования из красножгущегося глинистого сырья и красящих добавок. В качестве глинистого сырья использовался суглинок (Кемеровская обл.), окрашивающего компонента – отходы добычи марганцевых руд (Таштагольский район Кемеровской обл.).

При разработке методики определения цветовой характеристики керамических образцов использовались цифровая фотокамера, цветной струйный или лазерный принтеры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для декоративного керамического кирпича, выпускающегося на современных кирпичных заводах, характерно доминирование технологий объемного или поверхностного окрашивания изделий, имеющих широкую цветовую гамму (рис. 1). При этом в отличие от глазурованного или двухслойного кирпича (рис. 1а) цветовая линейка объемно окрашенных материалов имеет в основном три базовых направления цвета:

стандартного (кирпично-красного), светло-белого или темно-коричневого. На производственном сленге их соответственно направлению цвета часто именуют «апельсин», «абрикос», «солома», «персик», «слоновая кость», «шоколад» и др. (рис. 1б).

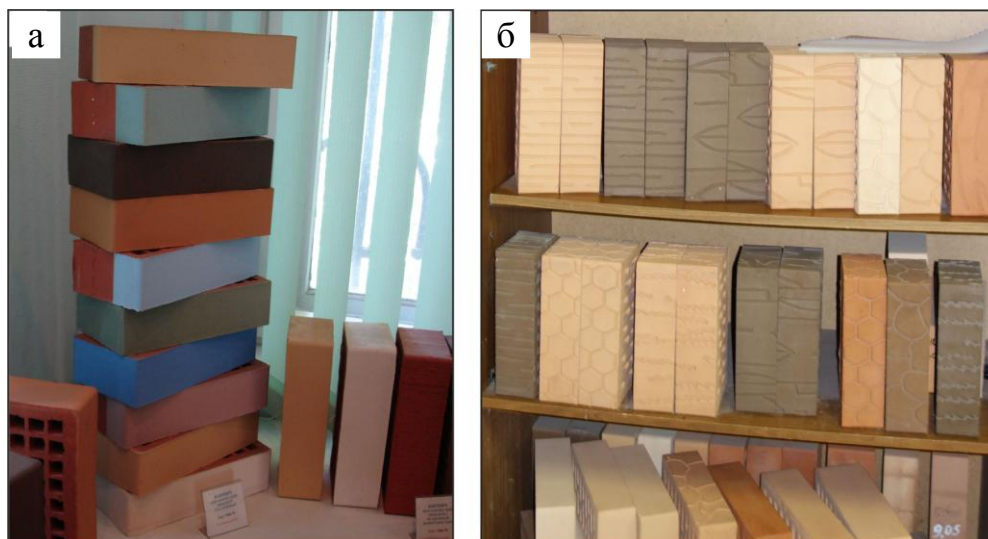


Рис. 1. Декоративный керамические изделия:
а – кирпич поверхностного окрашивания (Санкт-Петербург, 2008 г.);
б – кирпич объемного окрашивания (Ленинск-Кузнецк, 2017 г.)

В настоящее время на рынке декоративных окрашенных керамических материалов не существует единой палитры цветов. Например, цвет кирпича «слоновая кость», выпускаемого одним производителем, может значительно отличаться от цвета кирпича с идентичным названием, выпускаемого другим производителем. Отсутствует также регламент наименований этих цветов, вследствие чего разные производители именуют один цвет по-разному. Расцветка «шоколад» также может иметь целую гамму оттенков от темного, «горького», до светлого, «молочного», шоколада и др.

Для точного определения цвета производимого керамического материала, а также для его корректировки с целью получения необходимого оттенка авторами предложен метод цифрового анализа цветовой характеристики образца керамического материала. Метод заключается в определении цвета при помощи цифрового программного обеспечения с использованием поправки на условия освещенности керамических образцов, особенностей светочувствительной матрицы цифровой фотокамеры, конструкцию и чернила (цветовой тонер) печатающего устройства. Весь процесс определения цветовой характеристики исследуемого объекта состоит из четырех этапов.

На первом этапе для определения коэффициентов изменения цвета в реальных условиях по сравнению с эталонным была создана палитра (рис. 2), содержащая восемь цветов, характеристика которых приведена в табл.1.

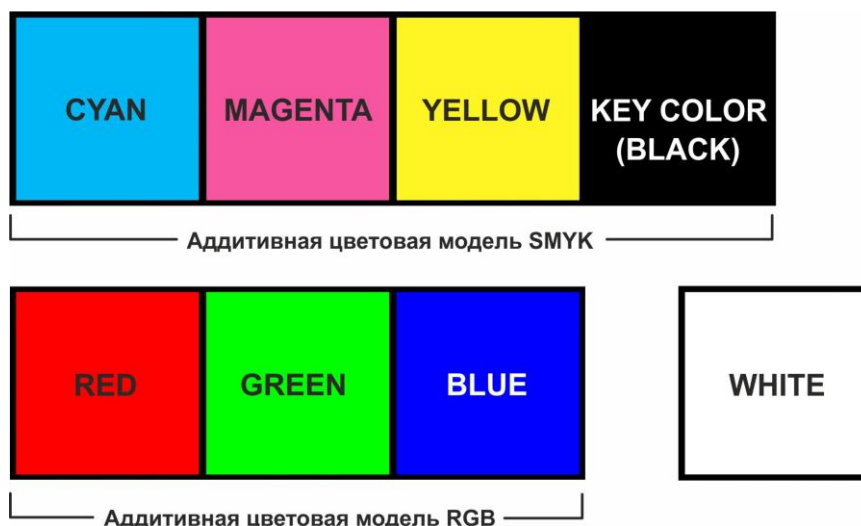


Рис. 2. Оригинальная цветовая палитра, синтезированная цифровым способом

Таблица 1. Характеристика цветовой палитры в зависимости от способа синтеза цвета

№ п/п	Название цвета	Аддитивная цветовая модель						
		RGB			CMYK			
		R	G	B	C	M	Y	K
1	Cyan	0	183	244	94	7	4	0
2	Magenta	246	85	160	5	95	7	0
3	Yellow	255	243	36	8	0	87	0
4	Key color (black)	0	0	0	58	46	41	95
5	Red	255	0	0	0	100	97	0
6	Green	0	255	0	91	0	100	0
7	Blue	0	0	255	83	72	0	0
8	White	255	255	255	0	0	0	0

При разработке цветовой палитры были использованы две системы синтеза цвета, основанные на аддитивных цветовых моделях RGB и SMYK; дополнительно был синтезирован белый цвет путем сложения трех цветовых каналов RGB.

На втором этапе исследований вначале была проведена печать разработанной оригинальной палитры на цветном лазерном принтере. Далее при одинаковых условиях освещенности (в нашем случае использовалось искусственное освещение) проведена одновременная съемка цифровой фотокамерой распечатанной цветовой палитры и лабораторных керамических образцов разного цвета (рис. 3).

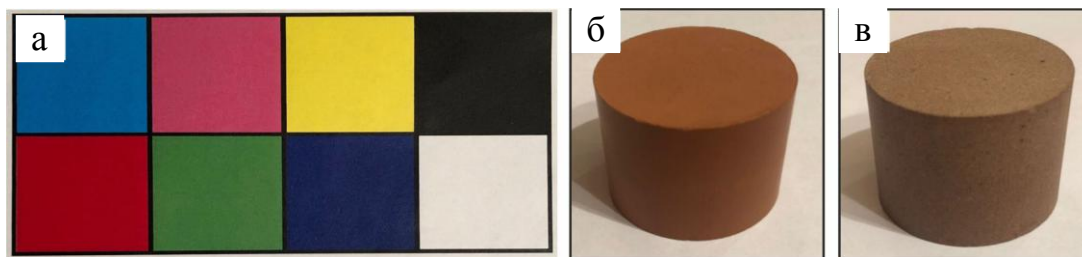


Рис. 3. Сфотографированные в одинаковых условиях цифровые изображения: а – отпечатанной цветовой палитры; б – керамического образца без добавки марганецсодержащих отходов; в – с добавкой марганецсодержащих отходов

На третьем этапе работы для исключения возможных искажений, связанных с микродефектами исследуемых объектов, и уменьшения неточностей и ошибок при цифровой идентификации цветовых каналов было проведено сглаживание фотоизображений. Для этого каждая область определенного цвета палитры и торцевые поверхности образцов обрабатывались в редакторе Adobe Photoshop.

На четвертом этапе работы было проведено сравнение оригинальной и сфотографированной цветовой палитры. Полученные значения цветовых каналов аддитивной системы RGB и SMYK сравнивались с оригинальными путем расчета поправочных коэффициентов, определяемых отношением «синтезированный оригинал» / «оцифрованная фотография». Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение оригинала и фотоизображения цветовой палитры

№ п/п	Название цвета	Оригинал			Фотография			Коэффициент			Средний коэффициент по каждому цвету
		R	G	B	R	G	B	R	G	B	
1	Cyan	0	183	244	1	87	141	0	2.10	1.73	1.28
2	Magenta	246	85	160	176	58	84	1.40	1.46	1.90	1.59
3	Yellow	255	243	36	230	203	53	1.11	1.20	0.68	1.00
4	Key color	0	0	0	32	31	27	0	0	0	0
5	Red	255	0	0	149	0	19	1.71	0	0	1.71
6	Green	0	255	0	62	110	53	0	2.32	0	2.32
7	Blue	0	0	255	29	37	77	0	0	3.31	3.31
8	White	255	255	255	228	219	208	1.12	1.16	1.22	1.17

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные поправочные коэффициенты цветовых каналов позволяют исключить неточности и ошибки при определении цвета из-за условий освещенности и снизить субъективность оценки цветовой характеристики декоративных керамических материалов через использование цифровых колористических баз данных по установленным параметрам цвета RGB-модели.

Исследования проведены при поддержке стипендии Президента России, исследовательский проект SP-4752.2018.1.

Библиографический список

1. Семенов, А.А. Строительство и промышленность строительных материалов в 2017 году. Краткосрочный прогноз / А.А. Семенов // Строительные материалы. 2018. № 4. С. 4–8.
2. Король, С.П. Разработка технологии керамического кирпича объемного окрашивания / С.П. Король, В.С. Гончаров // Строительные материалы. 1994. № 2. С. 12–14.
3. Чернов, В.В. Атлас архитектурных расцветок / В.В. Чернов, А.А. Пеганов. М.: Государственное издательство архитектуры и градостроительства, 1950. 21 с.

УДК 691.311

ВЫСОКООБЖИГОВЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ

*Х.-Б. Фишер, К.С. Петропавловский,
Т.Б. Новиченкова, В.Б. Петропавловская*

Высокообжиговые гипсовые вяжущие известны в Германии очень давно. В литературных источниках можно найти примеры их применения в качестве растворов для кладки и штукатурки как внутри здания, так и при строительстве наружных стен. Первые сооружения, в которых использовались рассматриваемые вяжущие, были построены на немецких землях в IX в. Большинство объектов, сохранившихся до нашего времени, возведено в Средние века [1–5]. Известно, что в то время обжиг гипса проводился простым способом: куски природного гипсового камня (рис. 1) нагревали путем сжигания деревянных поленьев.

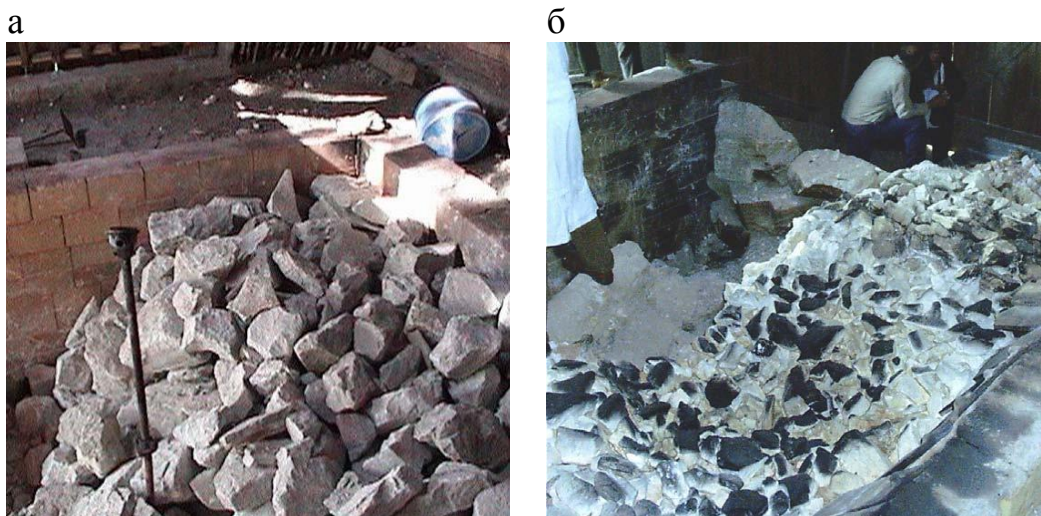


Рис. 1. Обжиг гипсового камня в камерной печи:
а – камень до обжига; б – после обжига

Современные исследования показали, что в таких условиях материал достигает температуры свыше 800 °С (рис. 2).

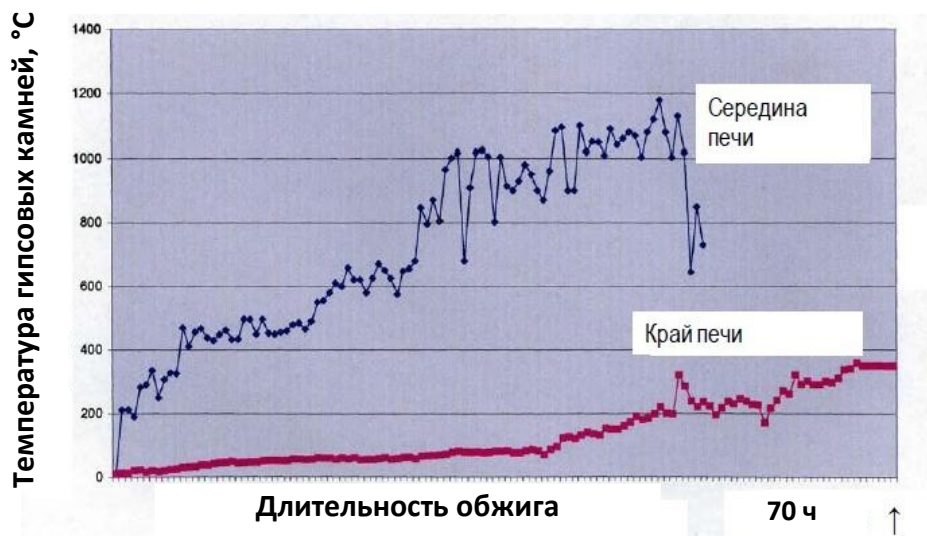


Рис. 2. Режим обжига гипсовых камней в камерной печи

Из-за различной термической нагрузки (рис. 3), обусловленной разными условиями перехода тепла и длительности его воздействия, а также разными величинами зерен, в процессе обжига дигидрата сульфата кальция (гипса) образуются различные фазы сульфата кальция (рис. 3).

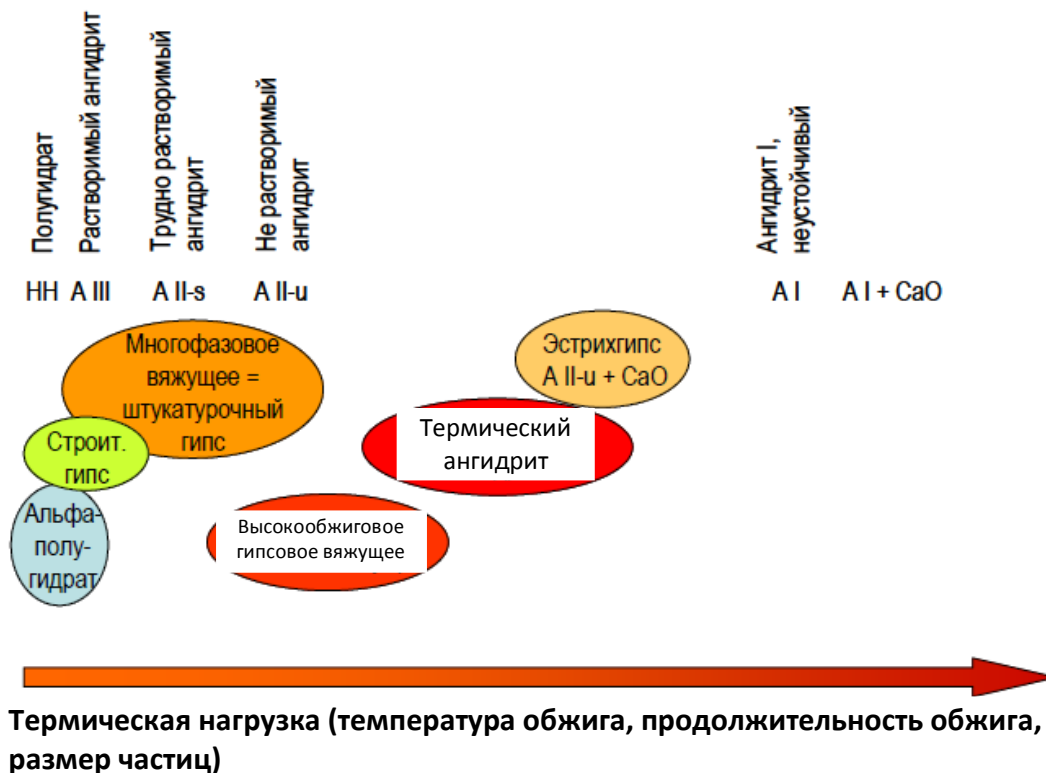


Рис. 3. Схема получения вяжущих на основе сульфата кальция в зависимости от термической нагрузки (температура обжига)

В работе выявлялись причины различной реактивности ангидрита, полученного при высоких температурах.

Для описания реакционной способности вяжущих на основе сульфата кальция годится как характеристика процесса растворения (при помощи кондуктометрии), так и связывания воды (процесса гидратации) [1–4] (рис. 4).



Рис. 4. Процесс гидратации высокообожженного гипсового камня после его помола с фазовым составом: нерастворимый ангидрит (48 ч) – 97.5... 98.7 %, трудно растворимый ангидрит – 0.4... 1.5 %

Для получения штукатурного раствора обычно смешивают высокообжиговый материал (ангидрит II) и строительный гипс (β -полугидрат) и в итоге получают вяжущее на основе сульфата кальция с требуемым фазовым составом. На практике обе фазы имеют примерно одинаковый объем. Реже применяется обжиг на колосниковой решетке, где обезвоживаются одновременно разные фракции гипсового камня [1].

На различных предприятиях для производства вяжущих на основе сульфата кальция используют часто только один агрегат (вращающуюся печь или котел). Поэтому стоит подумать, можно ли получить при использовании такого оборудования подходящие для производства гипсовой штукатурки вяжущие с уменьшенными энергозатратами по отношению к обжигу на колосниковых решетках.

Целью статьи является исследование влияния режима обезвоживания на фазовый состав вяжущего и различия между природным гипсовым камнем и дигидратом, полученным при очистке дымовых газов ТЭЦ (REA-гипс).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для получения вяжущих на основе сульфата кальция применяли разные исходные материалы (дигидрат сульфата кальция): два вида природного гипсового камня и REA-гипс. REA-гипс – это мелкозернистый материал, который также использовали для получения прессованных образцов (с добавлением 5 % воды) высотой примерно 2 см и диаметром 2 см. Природный гипсовый камень применялся в виде мелкого щебня (шплит – 5...10 мм). Пробы различались степенью загрязнения (содержанием примесей). Важные характеристики исходных материалов приведены в таблице.

Важные характеристики применяемых материалов

Показатель	Шплит из гипсового камня		REA-гипс
	№ 3	№ 4	
Свободная влажность, %	0.10	0.08	0
Количество кристаллической воды, %	20.4	18.4	20.3
Количество дигидрата, %	97.5	87.7	97.9
Удельная плотность, г/см ³	2.33	2.36	2.32

Целенаправленным выбором вида гипсового камня, размера зерен [2], а также температуры и продолжительности обжига можно достигнуть нужного фазового состава вяжущего для гипсовой штукатурки. По [3] он должен колебаться в таких пределах (в присутствии остатков дигидрата): полугидрат – 10...30 %; ангидрит III (растворимый) – 15...20 %; ангидрит II (нерастворимый) – 50...75 %.

Чтобы получить фазовый состав, соответствующий гипсовой штукатурке, было изучено влияние различных тепловых нагрузок. Пробы в тиглях подвергались обжигу в не нагретой заранее муфельной печи при температурах 300, 350 и 450 °С, продолжительность при этом составляла 2, 4 и 6 ч. Количество материала было всегда одинаково – примерно 50 г.

Фазовый состав вяжущих определяли по методике фирмы «Кнауф» [4]. Для труднорастворимого ангидрита (A II s) характерна гидратация в течение 72 ч. Нерастворимый ангидрит (A II u) превращается в дигидрат только после 72-часовой гидратации. В рамках этих исследований загрязнение исходного материала (содержание примесей) учитывалось как негидратизированный материал.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сначала обжигали мелкозернистый REA-гипс. Из-за типично узкого распределения зерен по их размерам (величине) нельзя было ожидать, что будут выявлены разные фазы в значительном количестве. Рис. 5 подтверждает правильность этого предположения. Уже первый режим

обжига (при температуре 300 °С и продолжительности 4 ч) показывает, что нельзя получить при использовании таких мелких частиц (в основном 50...70 мкм) одновременно полугидрат и ангидрит А II в один обжиг. Поэтому из мелкозернистого REA-гипса были получены прессованные образцы для изучения последствий укрупнения (рис. 6). Такие образцы размером примерно 2 см в каждом направлении нагревались медленнее, фазовый состав немного «улучшился».

Выявление тенденций изменения состава фаз при использовании «укрупненного» REA-гипса осуществляли с применением крупнозернистого гипсового камня (шплита). Применяли гипсовый шплит двух месторождений. Из-за разного содержания дигидрата (проба № 4 меньше пробы № 3) можно было ожидать различия в процессе обезвоживания.

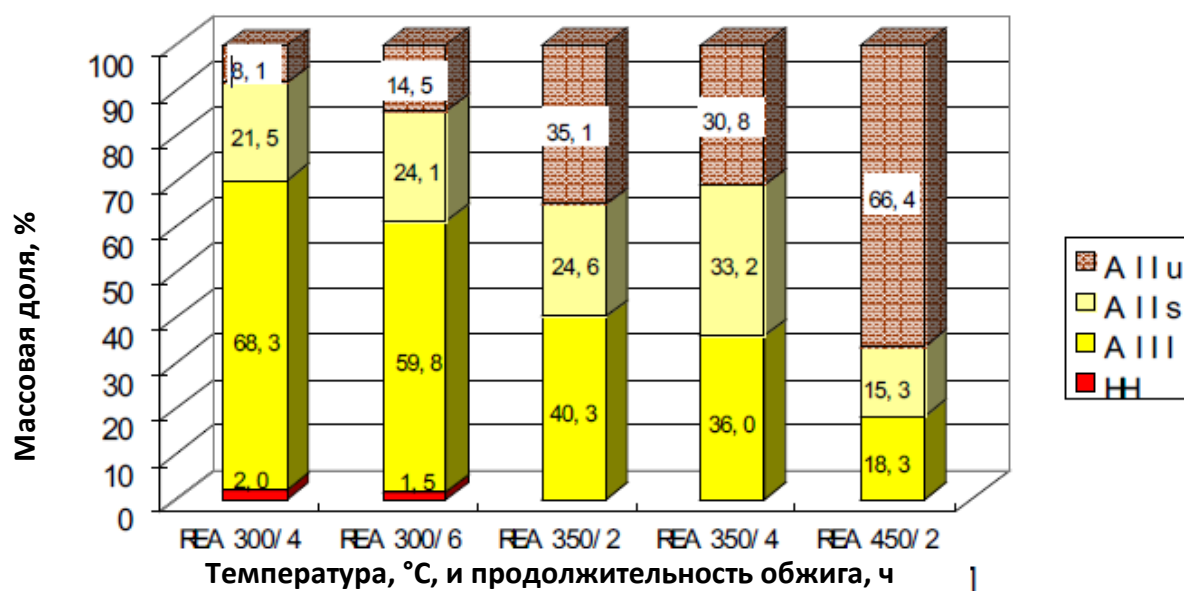
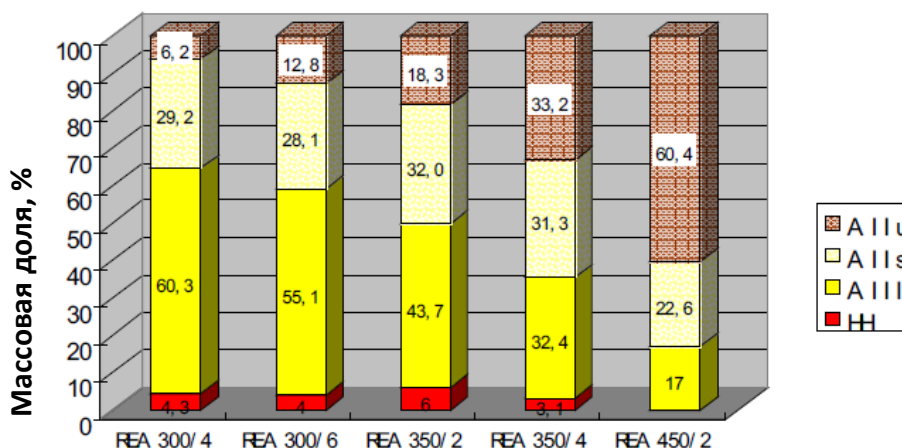


Рис. 5. Фазовый состав вяжущих в зависимости от режима обжига мелкозернистого REA-гипса

Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что при большем содержании дигидрата в гипсовом камне требуется больше энергии для обезвоживания. Таким образом, возникает меньшая доля высокотемпературных фаз А II.

Сравнение фазового состава вяжущих, полученных при тепловой нагрузке 4 ч и 350 °С из разных материалов, изображено на рис. 4. Видно, что возможно получение необходимого для гипсовых штукатурок фазового состава при использовании крупнозернистого материала и относительно низких энергозатрат. Для этого требуются дальнейшие исследования при более низких температурах.



Температура, °С, и продолжительность обжига, ч

Рис. 6. Фазовый состав вяжущих в зависимости от режима обжига отпрессованных образцов из мелкозернистого REA-гипса

Таким образом, проведенные исследования показали, что нужный для гипсовых штукатурок фазовый состав вяжущего может быть получен подбором режима тепловой обработки и размера зерен с учетом качества гипсового камня.

Библиографический список

1. Fischer, H.-B. Ursachendes Leitfähigkeitsabfalls während der Hydratation von Gipsmischungen / H.-B. Fischer. ZKG-International. 1994. № 47. S. 288–292.
2. Петропавловская, В.Б. Закономерности влияния зернового состава на свойства сырьевых смесей пресованных гипсовых материалов / В.Б. Петропавловская [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 6. С. 4–5.
3. Мюллер, М. Кондуктометрическое описание процессов взаимодействия сульфатов кальция с водой / М. Мюллер, Х.-Б. Фишер // Гипс, его исследование и применение: материалы международной научно-технической конференции. Красково, 2005. С. 63–70.
4. Hartmann, M. Untersuchungen zum Hochbrand von Calciumsulfaten / M. Hartmann. Studienarbeit. Bauhaus-Universität Weimar, 2007.
5. Хартман, М. Кондуктометрические исследования высокообоженных вяжущих на основе сульфата кальция / М. Хартманн [и др.] // Проблемы и достижения строительного комплекса: труды Международной научно-технической конференции «Стройкомплекс-2008» (15–17 января 2008 г., Россия, Ижевск). Ижевск: ИжГТУ, 2008. С. 192–195.
6. Nowak, S. To the Aging of Calcium Sulphate Binders Chemine Technologija / S. Nowak, H.-B. Fischer // Wissenschaftliche Zeitschrift der TU. 2004. № 33. S. 58–65.

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИЗОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА БАЗЕ МЕСТНОГО ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ

Р.З. Цыбина, П.В. Куляев, Т.Р. Баркая, А.В. Гавриленко

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для изготовления крупноразмерных стеновых панелей, плит, перекрытий широко применяется ячеистый бетон, для производства которого используют обычный или шлаковый портландцемент, известь, кварцевый песок и другие материалы, а также легкий бетон на искусственных пористых заполнителях (керамзите, аглопорите и т. п.). Недостаток легких бетонов – относительно высокая стоимость и большая объемная масса. Таким образом, изыскание новых видов строительных материалов с объемной массой до 700 кг/м^3 и высокой прочностью при низкой себестоимости изделий является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наиболее дешевым сырьем являются легкоплавкие кирпичные глины, на основе которых путем поризации (вспучивания) при высоких температурах можно получить строительные изделия и конструкции. А если изготавливать не мелкоштучные изделия, а крупногабаритные элементы, то и керамика может занять надлежащее место в индустриальном строительстве.

Цель наших исследований, посвященных выбору технологии получения крупноразмерных конструктивных элементов зданий ячеистой керамики (газокерамики с высокими физико-механическими показателями на основе местных глин), – выбрать способ, который бы обеспечивал использование дешевого местного сырья, возможность обойтись без дорогостоящих и дефицитных добавок, минимальные затраты на оборудование и его эксплуатацию, полную механизацию и автоматизацию технологического процесса, получение крупноразмерных офактуренных блоков полной заводской готовности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При анализе найденных способов получения ячеистой керамики нами был выбран способ вспучивания глинистого материала непосредственно во время обжига как наиболее перспективный для производства крупноразмерных поризованных изделий. Существует несколько способов получения пористой керамики.

Пористая керамика – это материал который создается специальными технологическими приемами.

Широко применяются изделия с пониженной кажущейся плотностью и высокой пористостью, достигающей до 90 % (например, изделия из чистых

оксидов Al_2O_3 , ZrO_2 , BeO и другие, алюмосиликатной и других составов керамики). Пористая керамика используется как теплоизоляционный материал, а также в целях фильтрации некоторых газов и жидкостей. Распространены три метода получения керамики:

- введение добавок,
- введение пенообразователей,
- выделение газов при помощи химических реакций.

Пористость и размеры пор влияют на пористость изделия.

Основные свойства пористой керамики – это теплоизоляция материала, газопроницаемость и теплопроводность.

Сущность рассматриваемой в ходе опытов технологии в ступенчатой термообработке и послойном вспучивании гранул глин, то есть вспучивание глинистых гранул производится послойно на поверхности вагонетки после соответствующей термopодготовки (в ускоренном нагревании глинистых пород до пиропластического состояния (до размягчения) с одновременным образованием и выделением в обжигаемом материале газообразных продуктов, способных произвести вспучивание).

При нагреве глинистых пород происходят следующие процессы: удаление свободной и физически связанной воды ($100\text{--}150^\circ$), химически связанной воды ($300\text{--}800^\circ$); диссоциация карбонатов с выделением свободной CO_2 ($600\text{--}950^\circ$); диссоциация сульфатов и сульфидов с выделением SO_2 ($550\text{--}1\ 000^\circ$); выгорание углерода ($900\text{--}1\ 000^\circ$); восстановление окислов железа с высвобождением газообразных продуктов (выше $1\ 000^\circ$); разложение глинистых минералов ($700\text{--}900^\circ$); разложение минералов магматических пород с выделением конституционной воды ($400\text{--}800^\circ$); одновременно с нагревом происходит размягчение материала и появление жидкой фазы (эвтектических расплавов) и др.

При медленном нагревании глинистой породы даже с хорошей вспучиваемостью не происходит ни вспучивания ее, ни образования мелкопористой структуры, характерной для глинистого материала. В этом случае образуется пористый черепок. Масса не вспучивалась в результате преждевременного удаления газообразных продуктов, то есть до приобретения оптимальной вязкости [1].

При ускоренной термической обработке глинистых пород температурные интервалы, в которых протекают вышеперечисленные процессы, смещаются в сторону более высоких температур, сближаются и частично накладываются друг на друга, а поэтому и возможно совмещение процесса газообразования с процессом перехода массы в пиропластическое состояние с оптимальной вязкостью, в результате чего происходит ее вспучивание.

В некоторых глинистых породах при их термической обработке образуется недостаточное количество жидкой фазы, вследствие чего они

способны претерпевать деформации лишь в слабой степени. Такие породы переходят в весьма вязкие и трудно текучие расплавы; при возникновении внутри них газообразных продуктов почти не вспучиваются.

За оптимальную вязкость легкоплавких вспучивающихся глин, определенную на вискозиметре «Оргресс», принимается вязкость от 108 до 106 пз. Она зависит в основном от химического и минералогического состава сырья и температуры.

В некоторых глинистых породах при их термической обработке образуется недостаточное количество жидкой фазы, вследствие чего они способны претерпевать деформации лишь в слабой степени [1]. Такие породы переходят в весьма вязкие, трудно текучие расплавы и при возникновении внутри них газообразных продуктов почти не вспучиваются. Наряду с этими имеются глинистые породы, которые при обжиге приобретают малую вязкость и тоже плохо вспучиваются в результате свободного выхода пузырьков газа из легкоподвижной растекающейся жидкости [2].

Поскольку глинистые образования не имеют определенной температуры плавления, для их характеристики особо важное значение имеет интервал температур, в котором происходят уменьшение кристаллической и нарастание жидкой фазы и связанный с этим переход материала из твердого в пластическое состояние. Такой интервал называют интервалом размягчения. Он определяет границы области температур оптимального вспучивания [3].

Интенсивность вспучивания зависит от условий, при которых происходит вспучивание. Оптимальные условия для вспучивания создаются при наличии и благоприятном сочетании нескольких факторов: температурных параметров, давления газа в порах, вязкости, поверхностного натяжения и смачиваемости расплава. Для порообразования необходимо наличие газовых пузырьков, которые могут быть эффективными только в том случае, если они, имея еще на стадии образования начальное давление, в состоянии будут увеличиваться в размерах настолько, чтобы превзойти критический радиус пор. Возникающие в расплаве пузырьки газа радиусом меньше критического не могут расширяться и произвести эффект вспучивания.

При ускоренной термической обработке глинистого сырья в нем возникают преимущественно восстановительные реакции, которые являются основным источником газообразной фазы при вспучивании глин. Но и сама восстановительная среда печи также выполняет роль интенсивного восстановителя. Вследствие этого вспучиваемость большинства глин в восстановительной среде значительно выше, чем в окислительной или нейтральной.

В лабораторных условиях проведено комплексное изучение сырья. Для использования выбраны глины разных месторождений, отличающихся

между собой по химико-минералогическому составу, гранулометрии глинистых фракций и другими свойствами, предопределяющими степень вспучивания. На основе этих глин были составлены опытные массы, приготовлены гранулы и предварительно подобраны оптимальные режимы термообработки и обжига. В лабораторных силитовых печах КО-14 были получены блоки размером 180 x 130 x 60 мм. Физико-механические испытания показали, что полученные образцы обладают высокой пористостью (87–75 %) с пределом прочности при сжатии 2.2–4.2 МПа при объемной массе 670–440 мг/м³ соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для стен обычно применяются материалы морозостойкостью 15–25 циклов. Образцы из поризованной керамики прошли 25 циклов попеременного замораживания и оттаивания без признаков разрушения.

В ходе рентгеноструктурного анализа полученных образцов обнаружено появление диопсидовой фазы, что позволяет предположить получение материала с более высокими физико-механическими характеристиками.

Библиографический список

1. Буткевич, Г.Р. Состояние и перспективы развития промышленности строительные материалов / Г.Р. Буткевич, С.А. Ковалев // Строительные материалы. № 3. 2006. С. 4–6.
2. Кондратенко, В.А. Достижение пластического состояния глинистого материала путем термической обработки / В.А. Кондратенко, В.Н. Пешков // Стройпрофиль. 2004. № 4.
3. Вакалова, Т.В. Перспективы расширения отечественной сырьевой базы строительной керамики за счет комплексного использования месторождений глинистого сырья / Т.В. Вакалова, В.М. Погребенков, И.Б. Ревва // Вестник науки Сибири. 2012. № 1. С. 339–340.

МЕТАДАННЫЕ СТАТЕЙ

УДК 666.9.03

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ В КОНТЕКСТЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ЖИЛИЩНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Акулова Инна Ивановна – д. э. н., доцент, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84. E-mail: akulovaii@yandex.ru

Славчева Галина Станиславовна – д. т. н., доцент, профессор кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84. E-mail: gslavcheva@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются проблемы и перспективы применения технологии 3D-печати в практике жилищного строительства. На основе комплексного подхода и SWOT-анализа выделены сильные и слабые стороны этих технологий, «закладывающие» параметры их эффективности. Приведены расчетные данные сравнения величины прямых затрат на 1 м² общей площади жилого малоэтажного объекта, возведенного на основе 3D-аддитивных строительных технологий, с традиционными сборными и монолитными технологиями строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: технологии 3D-печати, варианты сравнения, прямые затраты, эффективность.

EFFICIENCY OF APPLICATION OF 3D BUILD PRINTING IN MODERN CONSTRUCTION

Akulova Inna Ivanovna – doctor of economics, professor of department of technology of construction materials, products and designs of Voronezh state technical university, Voronezh, Russia. E-mail: akulovaii@yandex.ru

Slavcheva Galina Stanislavovna – doctor of engineering, professor of department of technology of building materials, products and construction, Voronezh state technical university, Voronezh, Russia. E-mail: gslavcheva@yandex.ru

ABSTRACT

Problems and potentials of using of 3D build printing are considered. It is shown the potentials, efficiency and challenges of 3D concrete printing according to SWOT analysis as an integrated approach. It is presented calculated data of direct costs of 1 m² cottage areas is built by 3D-additive construction technologies in comparison with the costs of 1 m² cottage areas is built by traditional building technologies.

KEYWORDS: 3D build printing, potentials, efficiency.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА

Александрова Ольга Владимировна – к. т. н., доцент, доцент кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: aleks_olvl@mail.ru

Нгуен Дык Винь Куанг – аспирант кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: ndvquang@hueic.edu.vn

АННОТАЦИЯ

Исследованы свойства бетонов, содержащих тонкомолотый кварцевый порошок в качестве частичной замены (до 20 % масс.) мелкого заполнителя, а также микрокремнезем и топливную золу-унос в количествах 5; 7,5; 10; 12,5; 20 и 30 % масс. соответственно взамен части цемента в составе вяжущего. Был получен, благодаря влиянию тонкодисперсных минеральных добавок, бетон с более высокой прочностью по сравнению с тяжелым бетоном без таких добавок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тонкодисперсные минеральные добавки, зола-уноса, микрокремнезем, кварцевый порошок, прочность на сжатие, прочность на осевое растяжение, прочность на растяжение при изгибе.

INFLUENCE OF MINERAL ADDITIVES ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

Aleksandrova Olga Vladimirovna – candidate of engineering, associate professor, department of technologies of cohesive materials and concretes of Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia. E-mail: aleks_olvl@mail.ru

Nguyen Duc Vinh Quang – postgraduate student of department of technologies of cohesive materials and concretes of Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia. E-mail: ndvquang@hueic.edu.vn

ABSTRACT

This article presents the results of the study of concrete containing fine quartz powder as a partial replacement of fine aggregate up to 20 %, silica fume with fly ash as partially replacement of Portland cement with content of 0, 5, 7.5, 10, 12.5 and 30 % by weight. The influence of fine mineral additives on concrete structure were established. The incorporation of silica fume optimizes the microstructure of the concrete and make it more dense and homogeneous.

KEYWORDS: mineral admixture, fly ash, silica fume, quartz powder, compressive strength, split tensile strength, flexural strength of concrete.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАСТИФИКАТОРОВ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА**

Али Рушди Ахмед – аспирант, Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: rushdiahmad@mail.ru

Белов Владимир Владимирович – советник РААСН, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

Абрамов Даниил Генадьевич – аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: daniilabramow@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье сделан сравнительный анализ и указано, какой следует выбрать суперпластификатор для изготовления газобетона неавтоклавного твердения путем исследования влияния пластифицирующей добавки на водоредуцирующий эффект сырьевой смеси с использованием пылевидных базальтовых отходов, молотого кварцевого песка и на физико-механические характеристики газобетона неавтоклавного твердения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пылевидные базальтовые отходы, молотый кварцевый песок, неавтоклавный газобетон, суперпластификатор СП-1, гиперпластификатор, водоредуцирующий эффект.

**PLASTICIZERS FOR GAS CONCRETES
NON-AUTOCLAVE HARDNESS BASED ON DUSTABLE BASALT
WASTES AND MOLDED QUARTZ SAND**

Ali Rushdie Ahmed – graduate student of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: rushdiahmad@mail.ru

Belov Vladimir Vladimirovich – advisor of RAACS, doctor of technical sciences, professor, head of department of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail:vladim-bel@yandex.ru

Abramov Daniil Genadevich – graduate student of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: daniilabramow@mail.ru

ABSTRACT

The aim of the work is a comparative analysis and selection of a superplasticizer for the manufacture of non-autoclaved aerated concrete, by examining the influence of the plasticizer on the water-reducing effect of the raw mix, dust-like basalt waste and ground quartz sand on its physical and mechanical properties of non-autoclaved aerated concrete.

KEYWORDS: dusty basalt waste, ground quartz sand, non-autoclaved aerated concrete, super-plasticizer SP-1, hyper-plasticizer, water-reducing effect.

УДК 517.9

АКТУАЛЬНОСТЬ И ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

Артемьев Алексей Анатольевич – д. э. н., доцент, проректор по научной инновационной деятельности, Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: aaartemev@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Исследованы и обобщены преимущества использования математического моделирования в строительном материаловедении как прогрессивного метода разработки востребованных инновационных строительных материалов, изделий и конструкции с наименьшими затратами и в кратчайшие сроки. Выявлены и обоснованы этапы оптимизации полученной модели (строительного материала). Определены области использования математического моделирования в строительном материаловедении. Охарактеризованы наиболее распространенные виды используемых моделей и эффективность их применения в строительном материаловедении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическое моделирование, строительное материаловедение, инновационные строительные материалы.

RELEVANCE AND ADVANTAGES OF USE OF MATHEMATICAL MODELLING IN CONSTRUCTION MATERIALS SCIENCE

Artemyev Alexey Anatolyevich – doctor of economics, associate professor, vice rector for science and innovation activities of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: 1aaartemev@rambler.ru

ABSTRACT

In the submitted article advantages of use of mathematical modeling in construction materials science as progressive method of development of demanded innovative construction materials, products and design with the smallest expenses and in the shortest possible time are investigated and generalized. Stages of optimization of the received model (construction material) are revealed and proved. The fields of use of mathematical modeling in construction materials science are defined. The most widespread types of the used models and efficiency of their use in construction materials science are characterized.

KEYWORDS: mathematical modeling, construction materials science, innovative construction materials.

УДК 691.539

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЦЕПТУРЫ СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ И ТЕХНОЛОГИИ ПРЕССОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Белов Владимир Владимирович – советник РААСН, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

Изложены предпосылки оптимального проектирования составов сырьевых смесей для получения прессованных керамических изделий, базирующиеся на закономерностях формирования полидисперсных структур. Приведен выбор методов расчета влажности сырьевых смесей, обеспечивающей оптимальные параметры уплотнения смесей. Показано влияние влажности сырьевой смеси на упаковку ее частиц и насыпную плотность, а также пластическую прочность прессовки с учетом действия капиллярного сцепления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аутогезия, капиллярные силы, влияние влажности, сырьевые смеси, керамические материалы.

OPTIMIZATION OF THE COMPOUNDING OF THE RAW STOCK AND TECHNOLOGY OF THE PRESSED STONEWARES

Belov Vladimir Vladimirovich – doctor of engineering, professor, adviser of the Russian academy of architecture and building sciences, head of chair of building products and structures manufacture of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

ABSTRACT

The prerequisites of optimum projection of structures of raw stocks for receiving the pressed stonewares which are based on regularities of formation of unequigranular structures are explained. The choice of computational methods of the optimum humidity of raw stocks providing optimum parameters of consolidation of mixes is given. It is shown influence of humidity of a raw stock on packing of its particles and bulk weight and also plastic durability of pressing taking into account action of capillary coupling.

KEYWORDS: autogeziya, capillary forces, influence of humidity, raw stocks, stonewares.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КОНЦЕПЦИЯ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ АСУ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА НА ОТХОДАХ ПРОИЗВОДСТВА
МИНЕРАЛОВАТНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

Белов Владимир Владимирович – советник РААСН, д. т. н., профессор, заведующий кафедрой производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail:vladim-bel@yandex.ru

Абрамов Даниил Генадьевич – аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: daniilabramow@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Предлагается концепция автоматизированной системы управления технологическим процессом производства мелкозернистого бетона на отходах производства минераловатных изделий. Концепция содержит схему информационных логических связей формирования структуры бетона и алгоритм оптимизации минерального скелета в виде блок-схемы. В рассматриваемой концепции учтены основные необходимые этапы приготовления бетонной смеси с использованием отходов производства минераловатных изделий: предварительная подготовка этих отходов, их оптимальная дозировка и эффективное их введение в бетонную смесь, а также последующее ее перемешивание наиболее оптимальным способом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоматизированная система управления технологическим процессом, АСУ ТП, мелкозернистый бетон, отходы производства минераловатных изделий, ОПМИ, информационные логические связи, оптимизация гранулометрического состава.

**TECHNOLOGICAL CONCEPT OF A SPECIALIZED ACS
FOR THE PRODUCTION OF FINE-GRINED CONCRETE
ON MINERAL WOOL PRODUCT MANUFACTURING WASTE**

Belov Vladimir Vladimirovich – doctor of engineering, professor, adviser of Russian academy of architecture and building sciences, head of chair of building products and structures manufacture of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: vladim-bel@yandex.ru

Abramov Daniil Genadevich – graduate student of building products and structures manufacture of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: daniilabramow@mail.ru

ABSTRACT

The concept of an automated process control system for the production of fine-grained concrete on mineral wool products is proposed. The concept contains a diagram of informational logical links for the formation of a concrete structure and an algorithm for optimizing the mineral skeleton in the form of a

flowchart. In the concept under consideration, the main necessary steps for preparing a concrete mix using mineral wool product manufacturing waste are taken into account: preliminary preparation of this waste, their dosing, effective introduction of waste into the concrete mixture and their subsequent homogenization.

KEYWORDS: automated process control system, APCS, fine-grained concrete, mineral wool product manufacturing waste, MWPMW, information logical connections, optimization of particle size distribution.

УДК 691.5

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЫЛИ НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ АНГИДРИТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Бурьянов Александр Федорович – д. т. н., профессор кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: rga-service@mail.ru

Ткаченко Дмитрий Игоревич – магистрант кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26.

АННОТАЦИЯ

Описывается влияние металлургической пыли на структуру и свойства ангидритовых композиций и приводится сравнительный анализ физико-механических свойств ангидритовых композиций с различным количеством содержания металлургической пыли.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ангидритовые композиции, металлургическая пыль, модификаторы, прочность, водостойкость.

THE IMPACT OF THE METALLURGICAL DUST ON PROPERTIES AND STRUCTURE OF ANHYDRITE COMPOSITIONS.

Buryanov Alexander Fedorovich – doctor of engineering, professor of department of technologies of cohesive materials and concretes, Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia. E-mail: rga-service@mail.ru

Tkachenko Dmitriy Igorevich – undergraduate of department of technologies of cohesive materials and concretes, Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia.

ABSTRACT

The paper deals with the impact of the metallurgical dust on properties and structure of anhydrite compositions and comparison analysis of the physico-mechanical properties of anhydrite compositions with different amount of metallurgical dust.

KEYWORDS: anhydrite compositions, metallurgical dust, modifiers, compression strand, water fastness.

УДК 666.941.4:539.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ КОНТАКТОВ В ТВЕРДЕЮЩИХ СИСТЕМАХ

Гаркави Михаил Саулович – д. т. н., профессор, заместитель главного инженера по науке и инновациям ЗАО «Урал-Омега», 455037, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 89, стр. 7. E-mail: mgarkavi@mail.ru

Артамонов Андрей Владимирович – к. т. н., главный технолог ЗАО «Урал-Омега», 455037, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 89, стр. 7

Колодежная Екатерина Владимировна – к. т. н., ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4.

Пуршева Анастасия Викторовна – инженер-технолог ЗАО «Урал-Омега», 455037, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 89, стр. 7.

Ахметзянова Марьям Александровна – инженер-технолог ЗАО «Урал-Омега», 455037, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 89, стр. 7.

АННОТАЦИЯ

На основе системы модельных квазиреакций исследована кинетика образования межчастичных контактов в строительных материалах. Показано, что введение в твердеющую систему наноразмерных компонентов изменяет кинетику формирования коагуляционных и коагуляционно-конденсационных контактов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кинетика, контакт, наноразмерный компонент.

MODELING THE KINETICS OF CONTACT EDUCATION IN THE HARDENED SYSTEMS

Garkavi Mikhail Saulovich – doctor of technical sciences, professor, deputy chief engineer for science and innovations, CC «Ural-Omega», Chelyabinsk region, Magnitogorsk, Russia. E-mail: mgarkavi@mail.ru

Artamonov Andrew Vladimirovich – candidate of engineering, chief technologist, ZAO «Ural-Omega», Chelyabinsk region, Magnitogorsk, Russia.

Kolodezhnaya Ekaterina Vladimirovna – candidate of engineering, leading researcher, Institute of comprehensive exploitation of mineral resources named after academician N.V. Melnikov of Russian academy of sciences, Moscow, Russia.

Pursheva Anastasia Viktorovna – engineer-technologist, CC «Ural-Omega», Chelyabinsk region, Magnitogorsk, Russia.

Akhmetzyanova Maryam Alexandrovna – engineer-technologist, CC «Ural-Omega», Chelyabinsk region, Magnitogorsk, Russia.

ABSTRACT

Kinetics of formation of inter-particle contacts in the building materials is researched on the basis of the system of the model quasireactions. It is shown that the introduction of nano-sized components in the hardening system results in the change of the kinetics of formation of coagulation and coagulation-condensation contacts.

KEYWORDS: kinetics, contact, nano-sized component.

УДК 691.3:691.542

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ГИДРАТИРОВАННОЙ ЦЕМЕНТНОЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА БЕТОНА

Егоров Егор Сергеевич – аспирант кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: egoroves_ystu@mail.ru

Самченко Светлана Васильевна – д. т. н., профессор, профессор кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: samchenko@list.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены проблемы, существующие в технологиях рециклинга бетонных смесей, а также предложено их возможное решение. Приведены результаты экспериментального исследования влияния предварительно гидратированной цементной добавки на физико-механические свойства образцов на 28-е сутки твердения. В результате установлена зависимость прочности и плотности образцов от количества добавки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рециклинг, гидратация, физико-механические свойства.

THE INFLUENCE OF PRE-HYDRATED ADDITIVE OF CEMENT ON THE PROPERTIES OF CONCRETE

Egorov Egor Sergeevich – postgraduate student, department of technologies of cohesive materials and concretes of Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia. E-mail: egoroves_ystu@mail.ru

Samchenko Svetlana Vasilyevna – doctor of engineering, professor, professor of department of technologies of cohesive materials and concretes of Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia. E-mail: samchenko@list.ru

ABSTRACT

Currently one of main task about developing of any technology is minimization of environmental pollution. The article devoted to problems connected with recycle technology of concrete mix and suggestion of possible solution. Possible solution is using cement suspensions as an additive for new

concrete mix. Results of experimental investigation of influence between pre-hydrated additive of concrete and physico-mechanical properties of concrete sample are presented in the article. Influence between strength and density of concrete sample and quantity of concrete additive are established as a results.

KEYWORDS: recycling, hydration, physical and mechanical properties.

УДК 691.533

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ НА СВОЙСТВА ГИПСОИЗВЕСТКОВЫХ КОМПОЗИТОВ

Завадько Мария Юрьевна – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: 79043517876@yandex.ru

Петропавловская Виктория Борисовна – к. т. н. профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

Новиченкова Татьяна Борисовна – к. т. н. доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tanovi.69@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию влияния условий твердения модифицированного известью гипсового композита на характеристики получаемого камня. Описано влияние на свойства модифицированных известью гипсовых композитов выдерживания в среде, насыщенной углекислым газом. В ходе данных исследований выявлено, что принудительная карбонизация (выдерживание в углекислом газе) композитов приведенного состава способствует росту прочности гипсового камня посредством уплотнения структуры кристаллами карбоната.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гипсовое вяжущее, известковое вяжущее, углекислый газ, принудительная карбонизация, свойства, упрочнение.

INFLUENCE OF THE CONDITIONS OF HARDNESS ON THE PROPERTIES OF GYPSUM-LIME COMPOSITES

Zavadko Maria Yurievna – undergraduate, department of production of building materials and structures of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: 79043517876@yandex.ru

Petropavlovskaya Victoria Borisovna – Ph.D. of engineering sciences associate professor of building products and constructions of department of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

Novichenkova Tatiana Borisovna – Ph.D. of engineering sciences associate professor of building products and constructions department of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

ABSTRACT

The work is devoted to the study of the influence of the hardening conditions of lime-modified gypsum composite on the characteristics of the resulting stone. The paper describes the effect on the properties of lime modified gypsum composites of aging in a carbon dioxide-saturated medium. In the course of these studies, it was found that forced carbonation (aging in carbon dioxide), promotes the growth of the strength of the gypsum stone by compacting the structure with carbonate crystals.

KEYWORDS: gypsum binder, lime binder, carbon dioxide, forced carbonation, properties, reinforcement.

УДК 691.328.34:004.925.83

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ КОМПОЗИТНОЙ АРМАТУРЫ С КОНСТРУКЦИОННЫМ ПЕНОБЕТОНОМ

Котова Кристина Сергеевна – аспирант, старший преподаватель кафедры проектирования зданий и сооружений им. Н.В. Троицкого, Воронежский государственный технический университет, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84. E-mail: kottova-k@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты компьютерного моделирования сцепления конструкционного пенобетона со стеклокомпозитным, базальтокомпозитным и металлическим стержнями балочным методом. На основании анализа результатов, полученных при применении компьютерной модели, построены диаграммы зависимости влияния варьируемых параметров на величину проскальзывания арматурного стержня.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пенобетон, композитная арматура, сцепление, компьютерное моделирование.

COMPUTER MODELLING OF JOINT WORK OF COMPOSITE FITTINGS WITH CONSTRUCTIONAL FOAM CONCRETE

Kotova Kristina Sergeevna – Ph.D. student, assistant professor of department of design of buildings and constructions named after N.V. Troitskogo, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia. E-mail: kottova-k@yandex.ru

ABSTRACT

Article contains the results of computer modeling cohesion of constructional foam concrete with glass composite, basalt composite and metal reinforcement by a frame method. On the basis of the analysis of the results received at destruction of computer model, has constructed influence diagrams of the varied parameters at a value of reinforcing bars slipping.

KEYWORDS: foam concrete, composite fittings, cohesion, computer modeling.

УДК 539.3:620.193:669

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК, ПОДВЕРЖЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЮ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

Кузнецова Виолетта Олеговна – аспирант кафедры строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет, 300600, г. Тула, пр-т Ленина, д. 92. E-mail: kuznetsova_violetta@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В данной статье учет воздействия водородосодержащей среды базируется на нелинейных определяющих соотношениях для изотропных разносопротивляющихся сред, рассмотренных в работах А.А. Трещева. Множество известных методик расчета для материалов с приобретенной разносопротивляемостью имеет ряд недостатков, таких как накладываемые ограничения на механические характеристики материалов и недостаточная точность аппроксимации эмпирических данных при сложных видах напряженного состояния.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пологая оболочка, конечные разности, титановый сплав, нелинейное деформирование, изотропный материал, большие прогибы.

STRESS-DEFORMED STATE OF SPHERICAL SHELLS EXPOSED TO AGGRESSIVE MEDIA

Kuznetsova Violetta Olegovna – postgraduate student of department of construction, building materials and structures of Tula state university, Tula, Russia. E-mail: kuznetsova_violetta@mail.ru

ABSTRACT

In this article the consideration of the effects of a hydrogen-containing medium is based on the nonlinear defining relations for isotropic multiresistance media considered in the works of A.A. Treshchev. Many well-known calculation methods for materials with acquired spacing resistance have a number of drawbacks, such as limitations on the mechanical characteristics of

materials and insufficient accuracy of approximation of empirical data for complex types of stress.

KEYWORDS: spherical shell, finite differences, titanium allow, non-linear deformation, isotropic material, large deflections.

УДК 699.81

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОГНЕСТОЙКОСТИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СРЕДСТВ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.**

Крутских Андрей Викторович – аспирант кафедры автоматизации технологических процессов, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: mister.krutskih@mail.ru

Бровкин Андрей Викторович – доцент кафедры конструкций и сооружений, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: kalinin_kb@inbox.ru

Соколов Сергей Александрович – к. т. н. доцент кафедры конструкций и сооружений, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: gek.tver@mail.ru

Черемных Степан Валерьевич – старший преподаватель кафедры конструкций и сооружений, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: stepan_1986@bk.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены теоретические аспекты решения задачи огнестойкости строительных конструкций с применением программных средств. Дан укрупненный алгоритм комплексного решения подобной задачи. Сделаны соответствующие выводы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: огнестойкость, автоматизация проектирования, расчетный метод определения огнестойкости, пожарная нагрузка.

**THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF FIRE RESISTANCE
OF BUILDING STRUCTURES USING COMPUTER-AIDED DESIGN**

Krutskikh Andrey Viktorovich – post-graduate student, department of automation of technological processes of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: mister.krutskih@mail.ru

Brovkin Andrey Viktorovich – associate professor of department of structures and facilities of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: kalinin_kb@inbox.ru

Sokolov Sergey Aleksandrovich – Ph.D., associate professor of department of structures and facilities of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: gek.tver@mail.ru

Cheremnykh Stepan Valerievich – senior lecturer of department of structures and facilities of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: stepan_1986@bk.ru

ABSTRACT

The article deals with the theoretical aspects of solving the problem of fire resistance of building structures using software. Given the high-level algorithm for complex solution of such tasks. The relevant conclusions are made.

KEYWORDS: fire resistance, design automation, calculation method for determining fire resistance.

УДК 691.32

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННОГО КЕРАМЗИТОБЕТОНА

Курятников Юрий Юрьевич – к. т. н. доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

Кочетков Роман Сергеевич – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: cochetkov.roma2013@yandex.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается влияние модифицирующих добавок на свойства керамзитобетона. Разработаны математические модели зависимости предела прочности на сжатие, средней плотности и коэффициента конструктивного качества от содержания микронаполнителя, суперпластификатора и дисперсного волокна.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: керамзитобетон, математические модели, модификаторы.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MODIFIED CERAMZYTONE CONCRETE

Kuryatnikov Yury Yuryevich – candidate of engineering, associate professor of department of production of building materials and structures of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: yuriy-k@yandex.ru

Kochetkov Roman Sergeevich – undergraduate, department of production of building materials and structures of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: cochetckov.roma2013@yandex.ru

ABSTRACT

This paper discusses the effect of modifying additives on the properties of expanded clay concrete. Mathematical models have been developed for the dependence of the compressive strength, average density and the coefficient of structural quality on the content of microfiller, superplasticizer and dispersed fiber.

KEYWORDS: expanded clay concrete, mathematical models, modifiers.

УДК 691.3

ИССЛЕДОВАНИЕ КАМЕННЫХ ПОРОД РАЗЛИЧНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Москвин Роман Николаевич – к. т. н. доцент кафедры эксплуатации автомобильного транспорта, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28. E-mail: moskva_in@mail.ru

Юрова Варвара Сергеевна – аспирант кафедры технологии строительных материалов и деревообработки, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28. E-mail: var_lena@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Современные бетоны являются многокомпонентными и содержат в своем составе значительное количество минеральных наполнителей, прежде всего тонкомолотых горных пород. Поэтому определение свойств пород, используемых в бетонном производстве в качестве мелкодисперсного наполнителя, является актуальным. Определены важнейшие свойства каменных пород с использованием стандартных методик исследования.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: современный бетон, прочность, минеральная добавка, каменная мука.

RESEARCH OF STONE BREEDS OF VARIOUS FIELDS

Moskvin Roman Nikolaevich – candidate of technical sciences, associate professor of department of automobile transport operation of Penza state university of architecture and construction, Penza, Russia. E-mail: moskva_in@mail.ru

Yurova Varvara Sergeevna – postgraduate student, department of technology of building materials and woodworking of Penza state university of architecture and construction, Penza, Russia. E-mail: var_lena@mail.ru

ABSTRACT

Modern concretes are multicomponent and contain in their composition a significant amount of mineral fillers, primarily fine-ground rocks. Therefore, the determination of the properties of rocks used in concrete production as a fine filler is relevant. The most important properties of rocks are determined using standard research methods.

KEYWORDS: modern concrete, strength, mineral additive, stone flour.

УДК 666.7

КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДОМЕННОГО ШЛАКА (BFS)

Назарова Марина Юрьевна – д. т. н. профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308015, г. Белгород, ул. Победы, д. 85. E-mail: Nazarova_m@bsu.edu.ru

АННОТАЦИЯ

Изучено влияние температуры обжига и количества глинистого компонента в составе керамической шихты на основе доменного шлака (BFS) на формирование свойств стеновых керамических материалов. Получены данные по количественному и качественному фазовому составу образцов керамики. Установлены закономерности изменения физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик стеновых керамических материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: керамические материалы, доменный шлак, глина, спекание, физико-механические свойства, морозостойкость.

CERAMIC MATERIALS BASED ON DOMAIN SLAG (BFS)

Nazarova Marina Yurevna – doctor of engineering, professor of department of materials science and nanotechnology of Belgorod state national research university, Belgorod, Russia. E-mail: Nazarova_m@bsu.edu.ru

ABSTRACT

The influence of the firing temperature and the amount of clay component in the composition of a ceramic charge based on blast furnace slag (BFS) on the formation of the properties of wall ceramic materials was studied. Data on the quantitative and qualitative phase composition of ceramic samples were obtained. The regularities of changes in physical and mechanical properties and performance of wall ceramic materials.

KEYWORDS: ceramic materials, blast furnace slag, clay, sintering, physical and mechanical properties, frost resistance.

УДК 691.32

**ПОЛУЧЕНИЕ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА
НА СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛАХ ИЗ БЕТОННОГО ЛОМА
СНОСИМЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ**

Наруть Виталий Викторович – аспирант кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: insolent88@mail.ru

Ларсен Оксана Александровна – к. т. н., доцент, доцент кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: larsen.oksana@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Отмечено, что при демонтаже ветхих зданий образуется огромное количество бетонного и железобетонного лома. Поэтому этот материал целесообразно подвергать дроблению для получения щебня и отсева. Подчеркнуто, что отсев целесообразно подвергать активации совместно с сухим суперпластификатором на поликарбонатной основе. Сделан вывод, что щебень из дробленого бетона фр. 5–10 мм и полученный активацией микронаполнитель рационально использовать для получения самоуплотняющихся бетонов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: самоуплотняющийся бетон, бетонный лом, щебень, дробленый бетон, отсев дробления, активация, микронаполнитель.

**SELF-COMPACTING CONCRETE PRODUCED
WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATES OF DEMOLISHED
RESIDENTIAL BUILDINGS**

Naruts Vitaly Viktorovich – postgraduate student, department of technologies of cohesive materials and concretes of Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia. E-mail: insolent88@mail.ru

Larsen Oksana Aleksandrovna – candidate of engineering, associate professor, department of technologies of cohesive materials and concretes, Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia. E-mail: larsen.oksana@mail.ru

ABSTRACT

The main application of concrete waste is its use as a coarse aggregate in concretes. Recycled concrete fines can be also used in concrete mixtures as fine aggregates or fillers. Use of the prepared filler in SCC increases compressive strength more than 10 % in compare with SCC containing limestone powder and mechanically activated recycled concrete fines. The idea is to combine mechanical and chemical methods of activation. The present investigation shows that adding 0.5 % by mass of recycled concrete fines allows obtaining higher specific area at the same processing time.

KEYWORDS: self-compacting concrete, recycled concrete aggregates, recycled concrete fines, filler, mechanically activated.

УДК 691-492

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕНОПОЛНИТЕЛЕЙ В ГИПСОВЫХ КОМПОЗИТАХ

Петропавловский Кирилл Сергеевич – аспирант кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: ekrioro@gmail.com

Клетти Холгер – д. т. н., Веймарский строительный университет «Баухаус», Coudraystr. 11, D – 99421, Веймар, Германия. E-mail: holger.kletti@uni-weimar.de

Петропавловская Виктория Борисовна – к. т. н. профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

Новиченкова Татьяна Борисовна – к. т. н. доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tanovi.69@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Показано, что повышение качества и снижение веса гипсовых изделий требует разработки составов рабочих гипсовых смесей с наполнителями, обеспечивающими выполнение требований потребителей декоративных и стеновых строительных материалов и изделий. Сделан вывод, что это может позволить перенести акцент потребительского спроса с недорогих, но токсичных и пожароопасных полимерных изделий на качественные гипсовые образцы декоративно-отделочных изделий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: полугидрат сульфата кальция, гидросульфат-алюминат, вес, плотность, прочность.

THE USE OF FOAMS IN THE GYPSUM COMPOSITES

Petropavlovskiy Kirill Sergeevich – postgraduate student, department of technologies of cohesive materials and concretes of Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia. E-mail: ekrioro@gmail.com

Kletti Holger – Dr.-Ing., professor, department of building materials institute of building materials of Weimar university Bauhaus, Weimar, Germany. E-mail: holger.kletti@uni-weimar.de

Petropavlovskaya Victoria Borisovna – Ph.D. of engineering sciences, associate professor of building products and constructions department of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

Novichenkova Tatiana Borisovna – Ph.D. of engineering sciences, associate professor of building products and constructions department of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

ABSTRACT

Improving the quality and weight reduction of gypsum products requires the development of compositions of working gypsum mixtures with fillers, ensuring compliance with the requirements of consumers of decorative and wall building materials and products. This can make it possible to shift the focus of consumer demand from inexpensive, but toxic and fire-hazardous polymer products to high-quality gypsum samples of decorative and finishing products.

KEYWORDS: hemihydrate of calcium sulfate, hydrosulphuret, weight, density, strength.

УДК 666.7-024

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФОРМИРОВАНИЯ ЯЧЕИСТОЗАПОЛНЕННОЙ СТРУКТУРЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

Столбоушкин Андрей Юрьевич – д. т. н., доцент, профессор кафедры строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42. E-mail: stanyr@list.ru

АННОТАЦИЯ

Разработаны модели ячеистозаполненной структуры строительного керамического матричного композита на основе мало- или непластичного неспекающегося техногенного и природного сырья. Показано, что макроструктура материала состоит из матрицы, сформированной из легкоплавкой глинистой компоненты шихты, и ядер, сформированных из неспекающегося техногенного сырья. Сформулированы граничные условия создания керамических матричных композитов на основе техногенного сырья. Приведены петрографические и СЭМ-исследования керамики на основе гранулированных шламистых отходов обогащения железных руд.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: техногенные отходы, дисперсионная среда, дисперсная фаза, ячеистозаполненная структура, керамический матричный композит.

DEVELOPMENT OF MODEL OF FORMING A CELLULAR COMPLETE STRUCTURE OF BUILDING CERAMIC MATRIX COMPOSITES

Stolboushkin Andrey Yur'evich – doctor of engineering, professor, department of building technologies and materials, Siberian state industrial university, Kemerovo region, Novokuznetsk, Russia. E-mail: stanyr@list.ru

ABSTRACT

Models of a cell-filled structure of a building ceramic matrix composite based on low- or non-plastic non-caking technogenic and natural raw materials have been developed. The material macrostructure consists of the matrix formed from a low-melting clay component of the charge, and cores formed from non-caking technogenic raw materials. The boundary conditions for creating ceramic matrix composites based on technogenic raw materials are formulated. Petrographic and SEM studies of ceramics based on granulated slime iron ore dressing are given.

KEYWORDS: technogenic waste, dispersion medium, dispersed phase, cell-filled structure, ceramic matrix composite.

УДК 539.3:519.6.502

ОПИСАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СЛАБОНЕЛИНЕЙНЫХ ОРТОТРОПНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Трещев Александр Анатольевич – д. т. н., профессор, член-корреспондент РААСН, заведующий кафедрой строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92. E-mail: taa58@yandex.ru

Завьялова Юлия Андреевна – магистрант кафедры строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92.

Лапшина Мария Александровна – магистрант кафедры строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92.

Монастырев Юрий Александрович – магистрант кафедры строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92.

Чибрикина Валентина Дмитриевна – магистрант кафедры строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, д. 92.

АННОТАЦИЯ

Сформулированы энергетические уравнения взаимосвязи параметров деформированных и напряженных состояний ортотропных конструкционных материалов, обладающих аномальной упругостью и допускающих квазилинейное представление этих уравнений. Показана программа экспериментального определения жесткостных характеристик. Представлены эти характеристики для некоторых материалов. Проверена энергетическая состоятельность введенных уравнений состояния.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: потенциал деформаций, ортотропия, разносопротивляемость, квазилинейность, главные оси анизотропии.

DESCRIPTION OF WEAKLY NONLINEAR DEFORMATION OF ORTHOTROPIC COMPOSITE MATERIALS

Treshev Alexander Anatolyevich – doctor of technical sciences, professor, corresponding member of RAABN, head of department of construction, building materials and structures of Tula state university, Tula, Russia. E-mail: taa58@yandex.ru

Zavyalova Julia Andreevna – undergraduate, department of construction, building materials and structures of Tula state university, Tula, Russia.

Lapshina Maria Alexandrovna – undergraduate, department of construction, building materials and structures of Tula state university, Tula, Russia.

Monastyrev Juriy Alexandrovich – undergraduate, department of construction, building materials and structures of Tula state university, Tula, Russia.

Chibrikina Valentina Dmitrievna – undergraduate, department of construction, building materials and structures, Tula state university, Tula, Russia.

ABSTRACT

The energy equations of the relationship between the parameters of deformed and stressed states of orthotropic structural materials with anomalous elasticity and allowing quasi-linear representation of these equations are formulated. The program of experimental determination of stiffness characteristics is shown. These characteristics are presented for some materials. The energy consistency of the introduced equations of state is verified.

KEYWORDS: the strain potential, different resistancet, quasilinearity, orthotropy, the main axes of anisotropy.

УДК 624.131.5

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ СТРОИТЕЛЬСТВА

Трофимов Валерий Иванович – к. т. н. доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: vitrofa@mail.ru

Джабаров Амирджон Султонджонович – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: volnik_amir@mail.ru

Леушкин Виталий Юрьевич – магистрант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22.

Некрасов Андрей Алексеевич – студент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22.

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается актуальная проблема повышения эффективности работы бетонных дорожных плит для применения в сложных условиях строительства на Севере. Решение проблемы реализуется путем исполнения дорожной плиты комбинированной – двухслойной, в которой нижний слой выполняется из готовой композитной плиты. Выполнены комплексные испытания комбинированных двухслойных бетонных образцов-балочек с учетом площади анкеровки композитной плиты с верхним бетонным слоем. Показано, что прочность при изгибе комбинированной балочки на 35 % больше прочности обычной бетонной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: комбинированные плиты, бетон, прочность, изгиб, дорожная плита.

TO THE QUESTION OF INCREASE OF EFFICIENCY OF WORK OF ROAD SURFACES IN DIFFICULT CONDITIONS OF CONSTRUCTION

Trofimov Valery Ivanovich – candidate of engineering, associate professor of building products and structures of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: vitrofa@mail.ru

Dzhabarov Amirdzhon Sultondzhonovich – undergraduate, department of production of building materials and structures of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: volnik_amir@mail.ru

Leushkin Vitaly Yuryevich – undergraduate, department of production of building materials and structures of Tver state technical university, Tver, Russia.

Nekrasov Andrey Alekseevich – student, department of production of building materials and structures of Tver state technical university, Tver, Russia.

ABSTRACT

The article deals with the actual problem of improving the efficiency of concrete road slabs for use in complex construction conditions in the North. The solution of the problem is realized by the execution of the road plate combined – two-layer, where the lower layer is made of a finished composite plate. Performed comprehensive testing of combined double-layered concrete samples-cross the surface area of embedment of the composite plate with the upper concrete layer. It is shown that the bending strength of the combined beam

is 35 % higher than the strength of a conventional concrete beam. There was no purely brittle fracture of the shell.

KEYWORDS: combined plate, concrete, flexural strength, road plate.

УДК 666.7-026.613

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЦВЕТОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕКОРАТИВНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Фомина Оксана Андреевна – к. т. н. доцент кафедры строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42. E-mail: soa2@mail.ru

Столбоушкин Андрей Юрьевич – д. т. н., доцент, профессор кафедры строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет, 654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, д. 42. E-mail: soa2@mail.ru

Зенков Павел Сергеевич – бакалавр, ведущий специалист ООО «Экспертная Группа “ОТК”», 654007, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Покрышкина, д. 3, офис 14. E-mail: pavelze95@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Предложена методика определения цветовой характеристики декоративных керамических материалов. Дана характеристика цветовой линейки объемно окрашенного кирпича, основанной на трех базовых направлениях цвета. Разработана и синтезирована оригинальная цветовая палитра, построенная на аддитивных цветовых моделях RGB и SMYK. Установлено, что поправочные коэффициенты цветовых каналов снижают неточности при определении цвета окрашенных керамических материалов из-за условий освещенности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: декоративные керамические материалы, объемное окрашивание, цветовая характеристика керамики, аддитивная цветовая модель.

TO THE QUESTION OF THE ESTIMATION OF COLOR CHARACTERISTICS OF DECORATIVE CERAMIC MATERIALS

Fomina Oksana Andreevna – candidate of engineering, associate professor of department of building technologies and materials, Siberian state industrial university, Kemerovo region, Novokuznetsk, Russia. E-mail: soa2@mail.ru

Stolboushkin Andrey Yur'evich – doctor of engineering, professor of department of building technologies and materials, Siberian state industrial university, Kemerovo region, Novokuznetsk, Russia.

Zenkov Pavel Sergeevich – bachelor, leading specialist, OTK expert group LLC, Kemerovo region, Novokuznetsk, Russia. E-mail: pavelze95@mail.ru

ABSTRACT

A method for determining the color characteristics of decorative ceramic materials is proposed. It is given the characteristic of a color palette of a volume-colored brick, based on three basic color directions. An original color palette was developed and synthesized, built on additive color models RGB and SMYK. It is established that the correction factors of the color channels reduce inaccuracies in determining the color of painted ceramic materials due to the light conditions.

KEYWORDS: decorative ceramic materials, volume coloring, color characteristics of ceramics, additive color model.

УДК 691.311

ВЫСОКООБЖИГОВЫЕ ВЯЖУЩИЕ ВЕЩЕСТВА НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ

Фишер Ханс-Бертрам – д. т. н., Веймарский университет «Баухаус», Coudraystr. 11, D – 99421, Веймар, Германия. E-mail: hans-bertram.fischer@uni-weimar.de

Петропавловский Кирилл Сергеевич – аспирант кафедры технологий вяжущих веществ и бетонов, Московский государственный строительный университет, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. E-mail: ekrioro@gmail.com

Новиченкова Татьяна Борисовна – к. т. н. доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: tanovi.69@mail.ru

Петропавловская Виктория Борисовна – к. т. н. профессор кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена исследованию высокообжиговых гипсовых вяжущих, давно применяемых в Германии. Описано влияние на свойства гипсовых высокообжиговых вяжущих особенностей технологических параметров их получения. Из-за различной степени обжига, обусловленной разными условиями перехода тепла и длительности его воздействия, а также гранулометрическим составом зерен, в процессе обжига дигидрата сульфата кальция (гипса) образуются различные фазы сульфата кальция. Показано, что фазовый состав гипсового вяжущего зависит от режимов тепловой обработки и размера частиц с учетом качества гипсового камня. Так, при большем содержании дигидрата в гипсовом камне требуется

больше затрат энергии для обезвоживания, таким образом, возникает меньшая доля высокотемпературных фаз А II.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гипсовый камень, температура обжига, размер частиц, свойства.

HIGHLY BURNING INJECTIVE SUBSTANCES ON THE BASIS OF CALCIUM SULFATE

Fisher Hans-Bertram – Dr.-Ing., professor, department of building materials institute of building materials of Weimar university Bauhaus, Weimar, Germany. E-mail: hans-bertram.fischer@uni-weimar.de

Petropavlovskiy Kirill Sergeevich – postgraduate student, department of technologies of cohesive materials and concretes of Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia. E-mail: ekrioro@gmail.com

Novichenkova Tatiana Borisovna – Ph.D. of engineering sciences, associate professor of building products and constructions department of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: tanovi.69@mail.ru

Petropavlovskaya Victoria Borisovna – Ph.D. of engineering sciences, associate professor of building products and constructions department of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: victoriapetrop@gmail.com

ABSTRACT

The work is devoted to the study of gypsum cement, long used in Germany. The effect of the technological parameters of their production on the gypsum cement properties is described. Different conditions of heat transfer and the duration of its impact contribute varying degrees of firing. Grain size distribution on the result of gypsum calcination influences. In the process of burning calcium sulfate dihydrate (gypsum), various phases of calcium sulfate are formed. The phase composition of the gypsum binder depends on the heat treatment conditions and particle size. Quality of a plaster stone is considered. Thus, with a higher content of dihydrate in gypsum stone, more energy is required for dehydration. Thus, a smaller proportion of the high-temperature phases А II appears.

KEYWORDS: gypsum stone, firing temperature, particle size, properties.

УДК 691.421.2

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРИЗОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА БАЗЕ МЕСТНОГО ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ

Цыбина Раиса Захаровна – доцент кафедры конструкций и сооружений, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: zubina-rz@mail.ru

Куляев Павел Викторович – к. т. н. доцент кафедры конструкций и сооружений, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

Баркая Темур Рауфович – к. т. н., доцент, заведующий кафедрой конструкций и сооружений, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: btrs@list.ru

Гавриленко Алексей Владимирович – ассистент кафедры конструкций и сооружений, Тверской государственной технической университет, 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: gawaw@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье объяснена актуальность нахождения новых видов строительных материалов с объемной массой до 700 кг/м^3 и высокой прочностью при низкой себестоимости изделий. Выявлены технологии получения крупноразмерных конструктивных элементов зданий ячеистой керамики (газокерамики с высокими физико-механическими показателями на основе местных глин). В ходе исследований были получены поризованные изделия на базе местного глинистого сырья.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стеновые блоки, поризация, поризованная керамика, газокерамика, глины, местные материалы.

OBTAINING PORTEDED PRODUCTS ON THE BASIS OF LOCAL CLAY RAW MATERIALS

Tsybina Raisa Zakharovna – associate professor of department of structures and facilities of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: zubina-rz@mail.ru

Kuliaev Pavel Viktorovitch – Ph.D., associate professor of department of structures and facilities of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: p.kuliaev@yandex.ru

Barkaya Temur Raufovich – Ph.D., head of department of structures and facilities of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: btrs@list.ru

Gavrilenko Alexey Vladimirovich – assistant of department of structures and facilities of Tver state technical university, Tver, Russia. E-mail: gawaw@mail.ru

ABSTRACT

It is relevant to find new types of building materials with a bulk weight up to 700 kg/m^3 and high strength, with low cost of products and identification of the technology for producing large-sized structural elements of buildings of cellular ceramics (gas ceramics with high physicomechanical indicators based on local clays). In the course of the research, porous articles were obtained on the basis of local clay raw materials.

KEYWORDS: wall blocks, porisation, porous ceramics, gas ceramics, clays, local materials.

СОДЕРЖАНИЕ

Акулова И.И., Славчева Г.С.

Современные технологии 3D-печати в контексте эффективности их применения в жилищном строительстве..... 3

Александрова О.В., Нгуен Дык Винь Куанг

Влияние минеральных добавок на физико-механические свойства бетона..... 7

Али Рушди Ахмед, Белов В.В., Абрамов Д.Г.

Исследование влияния пластификаторов на характеристики неавтоклавного газобетона..... 12

Артемьев А.А.

Актуальность и преимущества использования математического моделирования в строительном материаловедении..... 17

Белов В.В., Абрамов Д.Г.

Технологическая концепция специализированной АСУ для производства мелкозернистого бетона на отходах производства минераловатных изделий..... 22

Белов В.В.

Оптимизация рецептуры сырьевой смеси и технологии прессованных керамических изделий..... 26

Бурьянов А.Ф., Ткаченко Д.И.

Влияние металлургической пыли на свойства и структуру ангидритовых композиций..... 35

Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В.,

Пуршева А.В., Ахметзянова М.А.

Моделирование кинетики образования контактов в твердеющих системах..... 38

Егоров Е.С., Самченко С.В.

Влияние предварительно гидратированной цементной добавки на свойства бетона..... 42

Завадько М.Ю., Петропавловская В.Б., Новиченкова Т.Б.

Влияние условий твердения на свойства гипсоизвестковых композитов..... 46

Котова К.С.

Компьютерное моделирование совместной работы композитной арматуры с конструкционным пенобетоном..... 50

Крутских А.В., Бровкин А.В., Соколов С.А., Черемных С.В.

Решение задачи огнестойкости строительных конструкций с применением средств автоматизированного проектирования..... 55

Кузнецова В.О.

Напряженно-деформированное состояние сферических оболочек, подверженных воздействию агрессивных сред..... 59

Курятников Ю.Ю., Кочетков Р.С.

Разработка математических моделей физико-механических свойств модифицированного керамзитобетона..... 64

Москвин Р.Н., Юрова В.С.

Исследование каменных пород различных месторождений..... 69

Назарова М.Ю.

Керамические материалы на основе доменного шлака (BFS)..... 74

Наруть В.В., Ларсен О.А.

Получение самоуплотняющегося бетона на сырьевых материалах из бетонного лома сносимых жилых зданий..... 80

Петропавловский К.С., Клетти Х., Петропавловская В.Б.,

Новиченкова Т.Б.

Применение пенонаполнителей в гипсовых композитах..... 84

Столбоушкин А.Ю.

Разработка модели формирования ячеисто-заполненной структуры
строительных керамических матричных композитов..... 87

***Трещев А.А., Завьялова Ю.А., Лапшина М.А., Монастырев Ю.А.,
Чибрикина В.Д.***

Описание деформирования слабонелинейных ортотропных
композитных материалов 92

Трофимов В.И., Джабаров А.С., Леушкин В.Ю., Некрасов А.А.

К вопросу повышения эффективности работы дорожных покрытий
в сложных условиях строительства..... 98

Фомина О.А., Столбоушкин А.Ю., Зенков П.С.

К вопросу оценки цветовой характеристики декоративных
керамических материалов..... 104

***Фишер Х.-Б., Петропавловский К.С., Новиченкова Т.Б.,
Петропавловская В.Б.***

Высокообжиговые вяжущие вещества на основе сульфата кальция... 109

Цыбина Р.З., Куляев П.В., Баркая Т.Р., Гавриленко А.В.

Получение поризованных изделий на базе местного глинистого
сырья..... 115

Метаданные статей..... 119

Инновации и моделирование в строительном материаловедении

*Материалы IV Международной научно-технической конференции
(19–20 февраля 2019 г.)*

Редактор Я.А. Петрова
Корректор Ю.А. Якушева
Технический редактор Ю.Ф. Воробьева

Подписано в печать 17.10.2019

Формат 60x84/16

Физ. печ. л. 9,25

Тираж 100 экз.

Усл.-печ. л. 8,6

Заказ № 58

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 7,1

С – 58

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, г. Тверь, наб. А. Никитина, 22