

Регулирование состава и свойств композитных покрытий для огнезащиты строительных конструкций

А.А. Леденев¹, Т.В. Загоруйко¹, В.Т. Перцев²,

О.Б. Рудаков², С.П. Козодаев²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж),

²Воронежский государственный технический университет

Аннотация: Представлены исследования, направленные на управление структурообразованием, регулирование состава и свойств вспучивающихся огнезащитных композитных покрытий (огнезащитных композитов) для обеспечения огнестойкости строительных конструкций. В работе на основе топологического анализа и моделирования структурообразования оптимизирован компонентный состав шунгита в огнезащитных композитах с требуемыми теплофизическими и прочностными характеристиками. Экспериментально установлена взаимосвязь структурных характеристик, изменения минерально-фазового состава и свойств огнезащитных композитов при высокотемпературном воздействии. Расчетно-аналитическим методом установлена эффективность огнезащитных композитов для повышения огнестойкости железобетонных конструкций. Полученные данные позволили развить представления о механизме структурообразования при взаимодействии частиц шунгита во вспучивающейся цементной системе при высокотемпературном нагреве и обоснованно подойти к созданию эффективных огнезащитных композитов для огнестойких строительных конструкций.

Ключевые слова: огнезащитные композиты, вспучивающиеся покрытия, шунгит, гранулометрия компонентов, оптимизация состава, моделирование структуры, структурообразование композитов, минерально-фазовый состав, свойства композитов, огнестойкость конструкций.

Обеспечение огнестойкости объектов строительного комплекса – важное направление в общей системе безопасности зданий и сооружений. Существующие нормативные требования предусматривают необходимость применения конструкций с повышенными значениями огнестойкости. Например, согласно требованиям Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 г., для противопожарных стен и перекрытий значения огнестойкости должны составлять до REI 150 и более. Изготовленные из рядового цементного бетона железобетонные конструкции не всегда обеспечивают данные параметры огнестойкости, в связи с чем необходима разработка дополнительных огнезащитных мероприятий [1].

Для повышения значений огнестойкости конструкций применяются различные способы и составы огнезащиты на основе минеральных и органических компонентов [2 – 4]. В качестве конструктивной огнезащиты применяются композиты на основе перлита, вермикулита и других вспученных сырьевых материалов, получаемых в производственных условиях [2, 5]. Также известны составы тонкослойных огнезащитных покрытий для бетона, однако при их использовании могут наблюдаться нежелательные явления, влияющие на эффективность: уменьшение толщины вспученного слоя покрытия вследствие разрушения его структуры, ухудшение свойств при повышенных значениях температуры прогрева конструкции и другие [6].

Одно из направлений дальнейших исследований в части повышения эффективности огнезащитных композитов для железобетонных конструкций – применение наполнителей и заполнителей в виде частиц природного шунгита, вспучивающихся в системе нанесенного на поверхность конструкции покрытия при высокотемпературном нагреве [7]. Актуальность применения шунгита (шунгитсодержащих материалов) и его разновидностей, как активных модифицирующих компонентов для строительных композитов с улучшенными физико-техническими и специальными свойствами показана в работах [8, 9]. Установлено, что влияние шунгита на взаимодействие с минералами цементного клинкера и изменение свойств композитов во многом обусловлено особенностями его химического и дисперсного состава [8]. Техническая эффективность применения шунгита во вспучивающихся композитах заключается в возможности обеспечения динамического снижения плотности, теплофизических параметров и скорости прогрева при сохранении требуемых прочностных показателей и адгезии к конструкции [7].

При создании строительных композитов, в том числе, термо- и жаростойких, известны методологические подходы, базирующиеся на изучении структуры в виде системы твердых тел, оптимизации их гранулометрического состава и регулировании других рецептурно-технологических параметров [10 – 12]. Для огнезащитных композитов представляется эффективным подход, основанный на комплексном изучении и систематизации данных по оценке взаимосвязи компонентного состава, структуры и минерально-фазовых преобразований во вспучивающейся системе при нагреве. Задача расширения представлений о механизме структурообразования огнезащитных композитов с учетом особенностей физико-химического взаимодействия компонентов при нагреве может быть успешно решена на основе современных знаний и методов исследований, представленных в соответствующих разделах математики, физики, химии, материаловедения. Совместное применение комплекса методов моделирования структуры, а также минерально-фазового и элементного анализа позволит глубже изучить исследуемый композит, повысить потенциал использования его функциональных характеристик.

Целью работы является оптимизация содержания и гранулометрии вспучивающегося шунгита в огнезащитных композитах на основе исследования формирующейся структуры и минерально-фазового состава при высокотемпературном воздействии.

При выборе методологии исследований и сырьевых материалов основывались на ранее выполненных разработках составов термостойких огнезащитных композитов, в которых применяли следующие компоненты [7]. В качестве вяжущего – портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства ЗАО «Оскол-цемент»: химико-минералогический состав C_3S – 69,3 %, C_2S – 10,7 %, C_3A – 8,8 %, C_4AF – 11,2 %; дисперсность 340 м²/кг; плотность истинная 3100 кг/м³, насыпная 1100 кг/м³. Заполнитель –

гранулированный шлак Липецкого металлургического комбината: химический состав SiO_2 – 38,1 %, CaO – 40,3 %, Al_2O_3 – 11,5 %, MgO – 7,0 %, Fe_2O_3 – 1,1 %, FeO – 0,3 %, Mn – 0,6 %, SO_3 – 0,5 %, S – 0,6; модуль крупности 2,98; плотность истинная 2300 кг/м^3 , насыпная 500 кг/м^3 . Микроармирующий компонент – тонкодисперсные обработанные волокна асбеста хризотилового марки А-6К-30: химический состав SiO_2 – 43,5 %, MgO – 41,3 %, Al_2O_3 – 0,6, Fe_2O_3 – 1,0 %, FeO – 0,4 %, CaO – 0,1 %, H_2O – 13,1 %; дисперсность $20 \text{ м}^2/\text{г}$; плотность истинная 2500 кг/м^3 , насыпная 200 кг/м^3 . Вспучивающийся компонент – природный шунгит месторождений Республики Карелия: химический состав SiO_2 – 57 %, C – 30,0 %, Al_2O_3 – 4,0 %, MgO – 1,2 %, K_2O – 1,5 %, CaO – 0,3 %, Fe_2O_3 – 2,5 %, TiO_2 – 0,2 %, Na_2O – 0,2 %, S – 1,2 %, $\text{H}_2\text{O}_{\text{крис.}}$ – 1,7 %; плотность истинная 2200 кг/м^3 , насыпная 400 кг/м^3 . Гранулометрический состав шунгита приведен в табл. 1.

Таблица № 1

Гранулометрический состав частиц шунгита			
Содержание частиц шунгита различных фракций, %			
1,25-2,5 мм	0,315-0,63 мм	0,16 мм	менее 0,16 мм
11,5	19,5	45,4	23,6

Для тонкодисперсных частиц шунгита – менее 0,16 мм методом лазерной дифракции дополнительно определялся гранулометрический состав. Установлено полидисперсное распределение частиц в интервале 1-100 мкм (рис. 1). Научно-практический интерес дальнейших разработок и создания композитов с применением шунгита, как активного системообразующего компонента, обусловлен его строением и проявлением физико-химических свойств поверхности [7 – 9]. Особенность дисперсных частиц шунгита, интегрированных в систему огнезащитных композитов – активное влияние на изменение структуры за счет вспучивания при высокотемпературном воздействии до $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2).

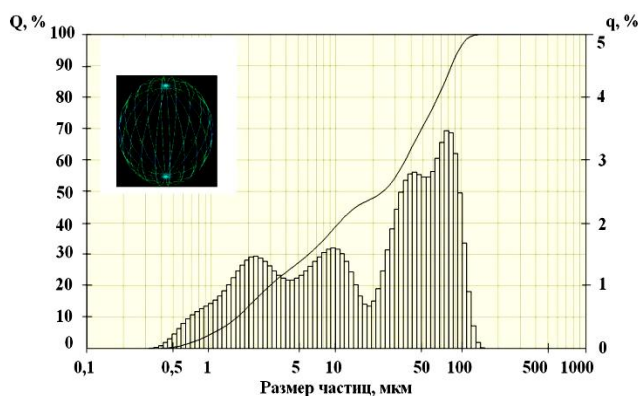


Рис. 1. – Дисперсный состав частиц шунгита фракции менее 0,16 мм

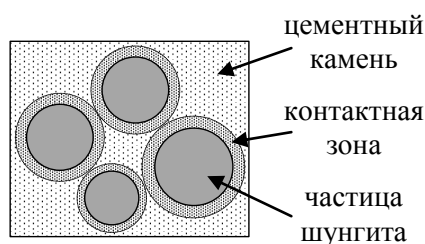


Рис. 2. – Схема изменения структуры контактной зоны и объема системы «цементный камень–шунгит» в составе огнезащитного композита

Кроме того, выбор шунгита обусловлен его составом – до 70 % включения кварца и до 30 % включения высокодисперсного шунгитового вещества размером 10–30 нм, отличающегося наличием фуллереноподобных систем [7]. Такое строение частиц, интегрированных в систему цементного камня огнезащитного композита, предопределяет их активное взаимодействие в физико-химических реакциях на границе раздела фаз, протекающих при высокотемпературном воздействии, с изменением структуры и минерально-фазового состава.

В связи с этим, исходя из цели работы, объектом исследований являлась вспучивающаяся система «цементный камень–шунгит», формирующаяся в структуре огнезащитного композита. Предмет исследований – структурообразование системы «цементный камень–шунгит» с учетом взаимодействия компонентов и изменения минерально-фазового состава при высокотемпературном воздействии. В ходе исследований

решались частные задачи: 1) моделирование структурообразования системы «цементный камень–шунгит» для оптимизации состава огнезащитного композита с требуемыми теплофизическими и прочностными характеристиками; 2) экспериментальное исследование структурных характеристик системы «цементный камень–шунгит» и изменения ее минерально-фазового состава при высокотемпературном воздействии; 3) расчетно-аналитическая оценка эффективности составов огнезащитных композитов по показателю огнестойкости железобетонных конструкций.

Решение задачи оптимизации и анализа взаимосвязи структуры и свойств проводили на основе модельных представлений топологического распределения частиц шунгита в структуре цементного камня, рассматриваемых в теории протекания (перколяции), применяемой в физике, химии и других областях для описания систем связанных структур (кластеров), состоящих из отдельных элементов [11, 13].

Рентгенофазовый анализ минерально-фазового состава огнезащитных композитов проводили на порошковом дифрактометре ARL X'TRA с применением CuK_α – излучения с $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$. На приборе используется универсальный метод анализа, позволяющий получить информацию о структуре и фазовом составе композита на основе расшифровки рентгенограмм по интенсивностям пиков (картотека ASTM). Методика подготовка проб являлась стандартной и заключалась в измельчении исследуемых огнезащитных композитов до порошкового состояния с размером частиц менее 100 мкм. Перед измельчением проб частицы заполнителя – гранулированного шлака отсеивали. В результате измерений получали рентгенограммы сформированных фаз затвердевшей системы «цементный камень–шунгит» без температурного воздействия и после термообработки композита в течение 60 минут в муфельной лабораторной печи с возможностью температурного воздействия до 1100 °С. Изменение

элементного состава в контактной зоне цементного камня огнезащитного композита оценивали на установке сканирующего микроскопа JSM-6380 LV. Среднюю плотность огнезащитного композита определяли по ГОСТ 12730.1-2020, прочность на сжатие – по ГОСТ 18105-2018, теплопроводность – по ГОСТ 7076-99. Для сравнительного анализа эффективности огнезащитного композита проводили расчетную оценку огнестойкости конструкций с покрытием и без него. Расчет огнестойкости железобетонных конструкций – колонны и плиты перекрытия проводили в программе Mathcad на основе существующих методических подходов [1].

Для обеспечения целостности структуры огнезащитного композита при нагреве с сохранением требуемых теплофизических и прочностных характеристик решалась задача оптимизации дисперсности и дозировки частиц шунгита. Применение крупных частиц более 5 мм исключалось, вследствие высокого коэффициента вспучивания, способствующего образованию напряжений в структуре цементного камня и снижению прочности композита. В связи с этим, предложено рациональное полидисперсное распределение частиц шунгита в диапазоне 0,16-2,5 мм, а также менее 0,16 мм (см. табл. 1, рис. 1).

Для дисперсно-наполненной системы «цементный камень–шунгит», включающей компоненты различной дисперсности характерно формирование вспученной структуры на микро- и макроуровнях. Задача оптимизации содержания шунгита ($V_{ш}$) в цементном камне решалась в рамках модельных положений теории протекания (перколяции), согласно которым критическая объемная доля наполнения, обеспечивающая формирование взаимосвязанной системы – кластеров, определяющей свойства всего композита, может быть реализована при топологическом распределении дисперсных частиц по касающимся и перекрывающимся сферам (рис. 3) [13].

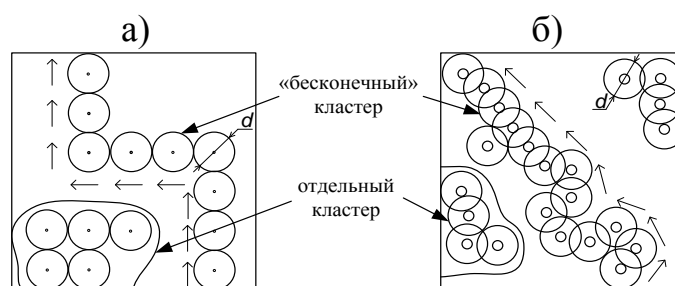


Рис. 3. – Модели, описывающие протекание частиц по касающимся (а) и перекрывающимся (б) сферам – дисперсным частицам шунгита

Согласно модельным представлениям, условия протекания соответствующие формированию «бесконечного» кластера, реализуются следующим образом [13]:

$$V_{ш1} = N_{ш1} \pi d_{ш1}^3 / 6 \approx 0,16 \pm 0,01 \quad (1)$$

$$V_{ш2} = N_{ш2} \pi d_{ш2}^3 / 6 \approx 0,32 \pm 0,01 \quad (2)$$

где $V_{ш1}$ и $V_{ш2}$ – объемная доля частиц шунгита, обеспечивающая формирование «бесконечного» кластера (протекание) по касающимся и перекрывающимся сферам; $N_{ш1}$, $N_{ш2}$, – количество частиц шунгита (плотность частиц в единице объема) цементного камня, обеспечивающее формирование «бесконечного» кластера по касающимся и перекрывающимся сферам; $d_{ш1}$, $d_{ш2}$ – диаметр частиц шунгита с учетом условий протекания.

Исходя из структурно-феноменологических представлений, в наполненной системе при $V_{ш2} \geq 0,32$ формула (2), соответствующей модели топологического распределения по перекрывающимся сферам (см. рис. 3б) в структуре композита будут формироваться напряжения за счет вспучивания шунгита при нагреве со значительным снижением прочности. Применение малонаполненных композитов при содержании шунгита $V_{ш2}$ значительно меньше 0,16 также представляется неэффективным, так как в структуре будет формироваться сеть невязанных отдельных систем – кластеров. В связи с этим, в качестве необходимой и достаточной концентрации в составе

цементного камня, с учетом плотности зерен шунгита, его дозировка составляла 16 % от объема портландцемента.

Экспериментально установлено, что принятая дозировка в диапазоне $V_{шл} = 0,15-0,16$ формула (1), обеспечивая формирование в композите модели – бесконечного взаимосвязанного «кластера» по касающимся сферам (см. рис. 3а), способствует получению целостной структуры огнезащитного композита. При дальнейшем увеличении дозировки шунгита наблюдается резкое падение прочности (рис. 4).

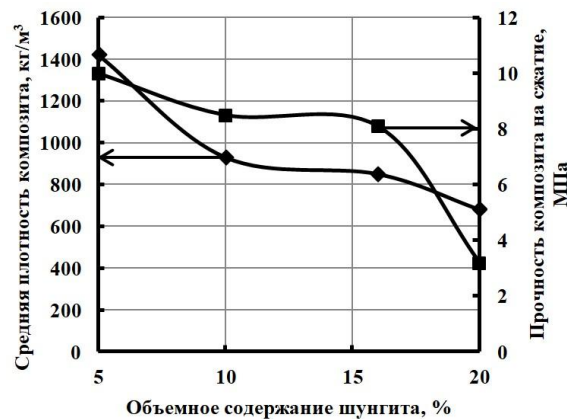


Рис. 4. – Изменение плотности и прочности огнезащитного композита при воздействии температуры 1100 °С

С учетом оптимизации содержания частиц шунгита в системе «цементный камень–шунгит», предложен следующий состав огнезащитного композита (кг/м³): портландцемент – 400; гранулированный шлак 900; асбест хризотилковый – 13; шунгит – 45; вода – 270-295 в зависимости от необходимой удобоукладываемой смеси [7].

Результаты испытаний при высокотемпературном воздействии до 1100 °С подтвердили правильность положений о выборе состава огнезащитного композита. Установлено, что при несущественном снижении прочности композита, образцы сохранили целостность – визуально наблюдается пористая структура без поверхностных трещин и

разрывов (рис. 5а, б). В отличие от образцов рядового цементного бетона, в которых образуются сквозные трещины и разрушения (рис. 5в). За счет поризации вспучивающихся частиц шунгита и снижения плотности огнезащитного композита установлено уменьшение его теплопроводности до 30 % с 0,26 до 0,19 Вт/(м·°С), что в условиях огневого воздействия на конструкцию будет способствовать замедлению скорости ее прогрева и повышению огнестойкости.

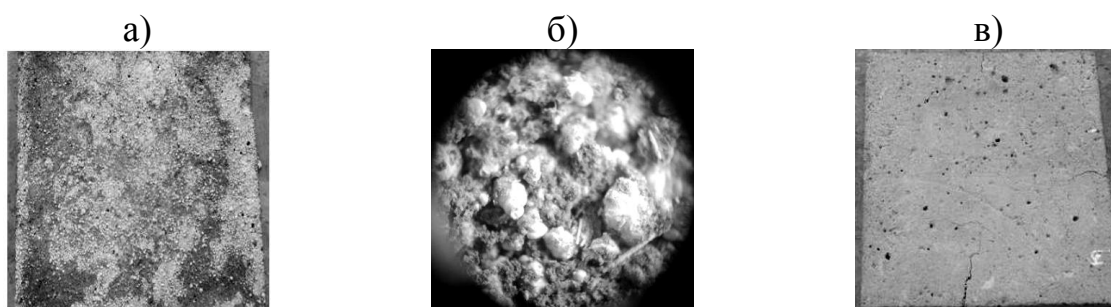


Рис. 5. – Образец огнезащитного композита и рядового цементного бетона после воздействия температуры 1100 °С: а) огнезащитный композит (без увеличения); б) огнезащитный композит (при увеличении в 10 раз); в) рядовой цементный бетон (без увеличения)

Существенными в расширении представлений механизма взаимодействия частиц во вспучивающейся системе явились результаты рентгенофазового анализа и изменения вещественного состава образцов прошедших испытания при температурах от 20 до 1100 °С (рис. 6). На основании анализа рентгенограммы огнезащитного композита без высокотемпературного воздействия при 20 °С установлено, что в сформированной системе присутствуют в основном следующие минералы: гидросиликаты кальция CSH (I) с соотношением Ca/SiO₂ менее 1,5 ($d = 3,04; 2,74; 1,83 \text{ \AA}$); гидросиликаты кальция CSH (II) с соотношением Ca/SiO₂ от 1,5 до 2 ($d = 3,07; 2,85; 2,80; 2,40 \text{ \AA}$); портландит ($d = 4,92; 3,11; 2,63 \text{ \AA}$); кварц SiO₂ ($d = 4,25; 3,34; 2,45; 2,28 \text{ \AA}$); кальцит CaCO₃ ($d = 3,04; 2,28; 2,09; 1,92; 1,87 \text{ \AA}$) (рис. 6а). При высокотемпературном воздействии до 1100 °С установлены существенные изменения минерально-фазового

состава (рис. 6б). Вследствие процессов дегидратации и диссоциации отмечается отсутствие гидросиликатов кальция, портландита, кальцита. Доминирующими фазами являются комплексные соединения типа силикатов кальция $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$, а также соединений $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ и $\text{Ca}_2(\text{Mg}_{0,75}\text{Al}_{0,25})$.

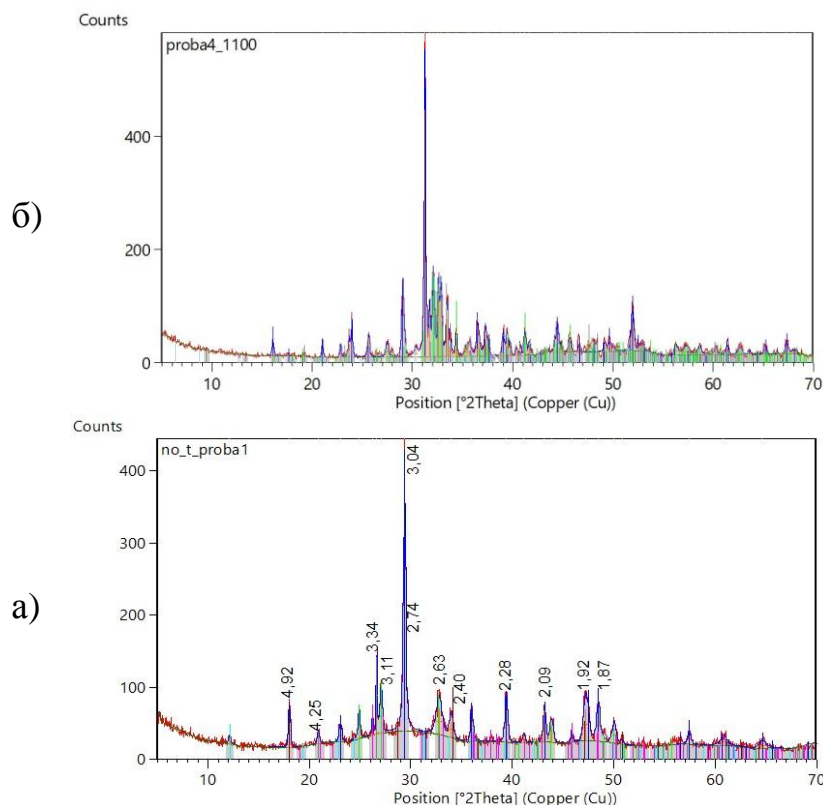


Рис. 6. – Рентгенограммы образцов огнезащитного композита без высокотемпературного воздействия при 20 °С (а) и прошедших испытания при температуре 1100 °С (б)

Отмеченные особенности структурообразования и качественные трансформации фаз композита при высокотемпературном нагреве сопровождаются количественными изменениями состава контактной зоны с частицами шунгита (рис. 7). При температуре 900-1100 °С установлено увеличение углеродосодержащих соединений в 15 раз, в то же время снижается содержание SiO_2 в 2 раза, а также CaO – в 3 раза. Изменение минерально-фазового и элементного состава свидетельствует об активном

влиянии частиц шунгита, включающего фуллереноподобные углеродные наноструктурные элементы, в структурообразовании цементного камня в результате окислительно-восстановительных реакций при интенсивном вспучивании шунгита. Это обеспечивает динамическое изменение теплофизических характеристик огнезащитного композита – снижение теплопроводности и замедление скорости прогрева конструкции при огневом воздействии с сохранением целостности структуры без существенного снижения прочности.

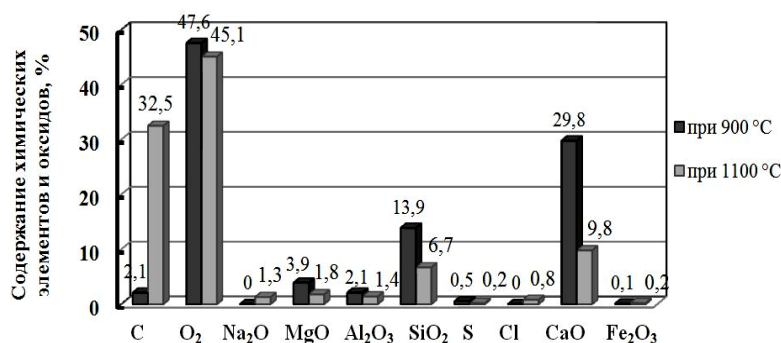


Рис. 7. – Изменение состава контактной зоны цементного камня с шунгитом при нагреве от 900 до 1100 °C

Для сравнительного анализа эффективности огнезащитного композита проводили расчетно-аналитическую оценку огнестойкости конструкций на основе существующих методических подходов [1]. В ходе расчетов установлено, что реализованные подходы к разработке составов огнезащитных композитов можно рекомендовать в качестве эффективных средств огнезащиты железобетонных конструкций (рис. 8). Для железобетонной плиты при толщине покрытия до 40 мм предел огнестойкости достигает R 340, что в 5,3 раза больше по сравнению с рядовыми конструкциями без огнезащиты, для железобетонной колонны предел огнестойкости R 230 в 3,8 раза выше.

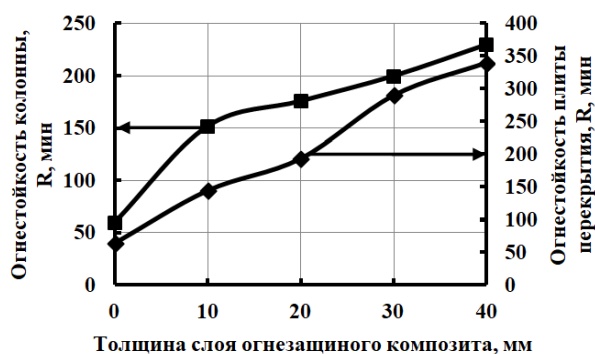


Рис. 8. – Влияние толщины слоя огнезащитного композита на пределы огнестойкости железобетонной колонны и плиты перекрытия

Выводы

В ходе исследований, направленных на управление структурообразованием, регулирование состава и свойств огнезащитных композитов, проведена оптимизация содержания и granulometрии вспучивающего шунгита. Экспериментально установлена взаимосвязь структурных характеристик, изменения минерально-фазового, вещественного состава и свойств огнезащитных композитов при высокотемпературном воздействии. Расчетom установлена эффективность предлагаемых композитов для повышения огнестойкости железобетонных конструкций. Полученные данные позволили расширить представления о механизме структурообразования при взаимодействии частиц шунгита во вспучивающейся системе при высокотемпературном воздействии и научно-обоснованно подойти к созданию эффективных огнезащитных композитов для огнестойких конструкций.

Литература

1. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М.: Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.

2. Тихонов Ю.М., Терехин С.Н., Аубакирова И.У., Шидловский Г.Л., Гугучкина М.Ю. Поведение огнезащитных материалов на основе вермикулита, перлита и минеральной фибры в условиях пожара. СПб.: СПбГАСУ, 2015. 148 с.

3. Tichonov Ju., Pukharenko Ju. Influence of high-porous filling material fiber on thermal and fire resistant properties of aerated composite // Applied mechanics and materials. 2015. Vol. 725-726. P. 257-277.

4. Tichonov Ju., Inchik V. Fire-Retarding Compositions on Gypsum Binders with the Use of Mineral High-Porous Aggregates and Fiber Fillers // World Applied Sciences Journal 23 (Problems of Architecture and Construction). 2013. P. 138-143.

5. Гугучкина М.Ю. О влиянии компонентов смесей на гипсовом вяжущем на их огнестойкость // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 4(39). С. 162-166.

6. Ройтман В.М., Габдулин Р.Ш., Щербина С.В. Механизм формирования огнезащитного эффекта вспучивающихся покрытий железобетонных конструкций при их нагреве // Наука и безопасность. 2012. №4. С. 40-50.

7. Перцев В.Т., Перова Н.С., Леденев А.А., Загоруйко Т.В. Влияние наноструктурирующих компонентов на характеристики цементного камня и свойства высокопрочных и термостойких бетонов // Известия КГАСУ. 2019. №3(49). С. 163-171.

8. Лукутцова Н.П., Пыкин А.А. Теоретические и технологические аспекты получения микро- и нанодисперсных добавок на основе шунгитосодержащих пород для бетона. Брянск: Изд-во БГИТА, 2013. 231 с.

9. Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., Потапова Л.И., Гарафиев А.М. Исследование структурообразования модифицированного шунгитсодержащего цементного камня методом ИК-спектроскопии // Известия КГАСУ. 2021. № 4(58). С. 70-81.

10. Белов В.В., Образцов И.В., Куляев П.В. Методология проектирования оптимальных структур цементных бетонов // Строительные материалы. 2013. №3. С.17-21.

11. Зарипова И.И. Подходы к проектированию составов строительных композиционных материалов на основе выводов теорий «перколяции» и «эффективной среды» // Евразийский Союз Ученых. Технические науки. 2016. №7(28). С. 11-13.

12. Гаджиев А.М. Хаджишалапов Г.Н., Хежев Т.А. Жаростойкий керамзитобетон на основе портландцемента с обожженным аргиллитом из смесей с предварительным форсированным электроразогревом // Инженерный вестник Дона, 2023, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8510.

13. Алексеева Е.В., Бобрышев А.Н., Воронов П.В., Головинский П.А., Лахно А.В., Перцев В.Т. Структурно-реологические свойства дисперсно-зернистых систем. Воронеж: ВГАСУ, 2010. 196 с.

References

1. Roitman V.M. Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoykosti proektiruemykh i rekonstruiруemykh zdaniy [Engineering solutions to assess the fire resistance designed and reconstructed buildings]. М.: Assotsiatsiya «Pozharnaya bezopasnost' i nauka», 2001. 382 p.

2. Tikhonov Yu.M., Terekhin S.N., Aubakirova I.U., Shidlovskiy G.L., Guguchkina M.Yu. Povedenie ognezashchitnykh materialov na osnove vermikulita, perlita i mineral'noy fibry v usloviyakh pozhara [Behaviour of fire-proof materials on the basis of vermiculite, perlite and a mineral hard fibre in the conditions of a fire]. SPb.: SPbGASU, 2015. 148 p.

3. Tichonov Ju., Pukharenko Ju. Applied mechanics and materials. 2015. Vol. 725-726. pp. 257-277.

4. Tichonov Ju., Inchik V. World Applied Sciences Journal 23 (Problems of Architecture and Construction). 2013. pp. 138-143.
 5. Guguchkina M. Ju. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2013. №4(39). pp. 162-166.
 6. Roitman V.M., Gabdulin R.Sh., Sherbina S.V. Nauka i bezopasnost'. 2012. №4. pp. 40-50.
 7. Pertsev V.T., Perova N.S., Ledenev A.A., Zagorujko T.V. Izvestiya KGASU. 2019. №3 (49). pp. 163-171.
 8. Lukutsova N.P., Pykin A.A. Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty polucheniya mikro- i nanodispersnykh dobavok na osnove shungitosoderzhashchikh porod dlya betona [Theoretical and technological aspects of deriving micro- and nanodispersible additives on a basis schungite of containing mucks for concrete]. Bryansk. Izd-vo BGITA, 2013. 231 p.
 9. Mukhametrakhimov R.Kh, Galautdinov A.R., Potapova L.I., Garafiev A.M. Izvestiya KGASU. 2021. № 4(58). pp. 70-81.
 10. Belov V.V., Obraztsov I.V., Kulyaev P.V. Stroitel'nye materialy. 2013. №3. pp. 17-21.
 11. Zaripova I.I. Evraziyskiy soyuz uchenykh. Tekhnicheskie nauki. 2016. №7(28). pp. 11-13.
 12. Gadjiev A.M., Hadzhishalapov G.N., Hezhev T.A. Inzhenernyy vestnik Dona, 2023, №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2023/8510.
 13. Alekseeva E.V., Bobryshev A.N., Voronov P.V., Golovinsky P.A., Lahno A.V., Pertsev V.T. Strukturno-reologicheskie svoystva dispersno-zernistykh system [Strukturno-rheological properties of dispersno-granular systems]. Voronezh: VGASU, 2010. 196 p.
-