

Д. т. н. В. Н. Соков (✉), к. т. н. В. В. Соков

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Москва, Россия

УДК 666.762.2:666.7

БЕСКЛИНКЕРНОЕ КОМПЛЕКСНОЕ ВЯЖУЩЕЕ ИЗ ОТХОДОВ ОГНЕУПОРОВ И ИЗДЕЛИЯ НА ЕГО ОСНОВЕ. Часть 3. Оптимизация состава комплексного вяжущего на основе кека и шлиф-порошков и установление взаимосвязи технологических факторов с его свойствами*

Для установления влияния каждого составляющего комплексного вяжущего и температуры его пропаривания запланирован и проведен четырехфакторный эксперимент. Определены входные, выходные параметры и стабильные факторы, уровни варьирования независимых переменных, взаимосвязь технологических факторов с физико-механическими свойствами камня вяжущего в водонасыщенном состоянии и после высушивания.

Ключевые слова: многофакторный эксперимент, входные и выходные параметры, уровни варьирования переменных, коэффициент размягчения камня, новообразования, силикатная матрица.

Для установления влияния гипса, извести и шлиф-порошка в комплексном кеко-известково-гипсо-шлиф-порошковом (КИГШ) вяжущем и температуры пропаривания на свойства силикатного камня, а также для сокращения количества опытов был запланирован и проведен четырехфакторный эксперимент. Входные параметры: содержание в вяжущем негашеной извести — X_1 ; расход двухводного гипса — X_2 ; расход шлиф-порошков — X_3 ; температура пропаривания — X_4 . Выходные параметры: предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов до сушки — Y_1 и после сушки — Y_2 ; предел прочности при изгибе водонасыщенных образцов до сушки — Y_3 и после сушки — Y_4 ; усадка при высушивании образцов после пропаривания — Y_5 и после водонасыщения — Y_6 ; водопоглощение камня — Y_7 ; коэффициент размягчения камня — Y_8 ; средняя плотность — Y_9 . В качестве стабильных факторов приняты пластичность теста вяжущего и режим пропаривания. Результаты планового многофакторного эксперимента приведены в таблице.

Взаимосвязь технологических факторов с пределом прочности при сжатии КИГШ-вяжущего в водонасыщенном состоянии описывается уравнением

$$Y_1 = 34,42 + 1,35X_1 + 1,27X_2 + 6,52X_3 + 6,00X_4 - 3,22X_1^2 - 5,28X_2^2 - 2,58X_3^2 + 2,92X_4^2 + 2,36X_1X_2 + 3,0X_1X_3 + 2,23X_2X_3 - 1,26X_2X_4 - 1,63X_3X_4. \quad (1)$$

Из анализа уравнения (1) видно, что наиболее значительное влияние на предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов оказывает температура пропаривания: ее повышение от 80 до 100 °С интенсифицирует реакции цементирующих веществ. Существенно влияет на предел прочности при сжатии образцов также содержание в вяжущем негашеной извести. Наибольшая прочность образцов достигается в составах, содержащих 30 % извести; дальнейшее увеличение ее количества снижает прочность образцов.

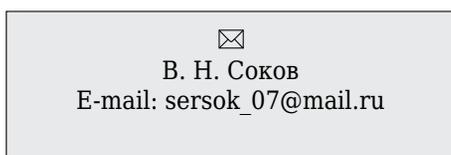
В образцах с добавкой гипсового вяжущего 5 % отмечается наибольшая прочность как при тепловлажностной обработке, так и при твердении во влажных условиях на всем интервале увеличения количества извести. Иначе происходит с 7 % гипсового вяжущего, которое уменьшает предел прочности при сжатии КИГШ-вяжущего. Несколько иное влияние технологических факторов на предел прочности при сжатии КИГШ-вяжущего после высушивания:

$$Y_2 = 50,44 + 4,14X_1 + 3,91X_3 + 3,82X_4 - 6,74X_1^2 - 4,54X_2^2 - 5,9XX_3^2 + 3,09X_1X_2 + 1,18X_1X_3 + 1,89XX_4 + 1,59X_2X_3 - 2,54X_2X_4. \quad (2)$$

Уровни варьирования независимых переменных

Уровень варьирования	Значение переменных			
	негашеная известь X_1	двухводный гипс X_2	шлиф-порошок X_3	температура пропаривания, °С, X_4
Основной (0)	25	5	5	90
Нижний (-)	10	3	10	80
Верхний (+)	40	7	20	100

* Части 1 и 2 статьи опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 4 за 2016 г.



После высушивания незначительное увеличение прочности вяжущего, пропаренного при различных температурах, достигается в образцах с 20–30 % извести, 3–5 % гипсового вяжущего и 15 % шлиф-порошка. Наибольшая прочность в образцах с 30 % извести и 5 % гипса, пропаренных при 90 °С. По мере повышения температуры пропаривания рост прочности несколько увеличивается. Самый высокий коэффициент размягчения силикатного камня ($K = 0,8 \div 0,95$) в составах на вяжущем с содержанием 30 % извести и 5 % гипсового вяжущего, пропаренных при 100 °С, а наименьший ($K = 0,48 \div 0,61$) — при 80 °С. Предел прочности при изгибе водонасыщенных образцов КИГШ-вяжущего в зависимости от технологических факторов описывается уравнением

$$Y_3 = 6,93 + 0,53X_1 + 0,66X_3 - 0,48X_4 + 2,08X_3^2 + 1,57X_4^2 + 0,38X_1X_2 + 0,92X_1X_4 + 0,35X_2X_3 - 1,08X_3X_4. \quad (3)$$

Наибольшее влияние на предел прочности при изгибе оказывает температура пропаривания; наиболее низкие результаты при 90 °С. Повышение температуры до 100 °С или ее снижение до 80 °С увеличивает предел прочности при изгибе приблизительно в 1,5 раза. Так, в вяжущем из 30 % извести, 5 % гипса и 15 % шлиф-порошка в зависимости от температуры пропаривания (80, 90, 100 °С) предел прочности при изгибе составляет 3,5, 2,9, 4,0 МПа соответственно. Такой характер изменения прочности связан, по-видимому, с различной интенсивностью процессов формирования структуры новообразований и, соответственно, напряженным состоянием силикатной матрицы.

После высушивания образцов предел прочности при изгибе резко снижается. Это происходит, очевидно, потому, что при пропаривании в вяжущем с высокой дисперсностью процессы формирования новообразований в основном закончились. Сформировался плотный камень с минимальным резервным пространством. При высушивании, по-видимому, идут перекристаллизация, укрепление новообразований и незначительное формирование новых цементирующих веществ. А так как это происходит в условиях ограниченного свободного пространства, то в материале возникают большие напряжения, в результате чего предел прочности при сжатии несколько повышается, а при изгибе — снижается.

После пропаривания в вяжущем с недостаточным количеством негашеной извести остается еще большое количество непрореагировавших веществ и структура материала менее плотная. Поэтому формирование новых цементирующих веществ при высушивании вяжущего, по-видимому, не создает напряженного состояния в силикатной матрице. В результате этого в некоторых составах после сушки предел прочности при изгибе даже несколько увеличивается.

Изменение усадки от водонасыщенного до сухого состояния описывается уравнением

$$Y_6 = 3,9 + 0,2X_1 + 0,67X_2 - 0,15X_3 - 0,39X_1^2 - 0,34X_2^2 - 0,29X_4^2 + 0,16X_1X_2 + 0,18X_1X_3 + 0,15X_1X_4 - 0,18X_3X_4. \quad (4)$$

Анализ этого уравнения показывает, что усадка КИГШ-вяжущего в основном зависит от содержания в нем негашеной извести и гипса. В вяжущем при повышении расхода сульфатной добавки с 3 до 7 % усадка увеличивается, а в составах, в которых количество извести уменьшается, а гипса растет, — незначительно уменьшается. Наибольшая усадка (3,6–4,0 мм/м) в КИГШ-вяжущем, содержащем 20–30 % извести, 7 % гипса и 15 % шлиф-порошка, наименьшая (1,4 мм/м) в КИГШ-вяжущем с 10 % извести и 3 % гипса. Почти аналогичный характер изменения усадки наблюдается при высушивании влажных образцов. Однако в численном значении эта усадка в 1,2–2,0 раза меньше, чем у водонасыщенных образцов. Водопоглощение КИГШ-вяжущего сравнительно невысокое — 19–20 % и по своему численному значению не превышает водопоглощения силикатного камня на основе известково-песчаного вяжущего.

Выполненные исследования физико-механических свойств КИГШ-вяжущего показали следующее. На предел прочности при сжатии и изгибе в наибольшей степени влияет температура пропаривания, ее повышение от 80 до 100 °С способствует увеличению предела прочности при сжатии водонасыщенных образцов на КИГШ-вяжущем в 3–4 раза. Наибольший предел прочности при сжатии (27 МПа) получен на вяжущем, содержащем 50 % кека, 15 % шлиф-порошка, 30 % извести и 5 % гипса. После высушивания предел прочности при сжатии КИГШ-вяжущего увеличивается до 37 МПа. Процесс высушивания в данном случае следует рассматривать как дополнительную термообработку. ■

Получено 03.03.16
© В. Н. Соков, В. В. Соков, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Global Graphene Forum

Всемирный форум по графену

23–25 августа 2016 г. г. Стокгольм, Швеция

vbripress.com/ggf/