

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

ФГБОУ ВО НИУ «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия

УДК 666.762.2:666.7

## БЕСКЛИНКЕРНОЕ КОМПЛЕКСНОЕ ВЯЖУЩЕЕ ИЗ ОТХОДОВ ОГНЕУПОРОВ И ИЗДЕЛИЯ НА ЕГО ОСНОВЕ\*

Выявлена зависимость карбонизации камня КИГШ-связующего от состава вяжущего и параметров тепловой обработки. В результате существенно меняется характер цементирующих новообразований камня, что отражается на его эксплуатационной стойкости. Для получения стойкого к карбонизации материала реализован четырехфакторный эксперимент и определены сочетания составляющих вяжущего и параметры тепловой обработки. Исследованы различные соотношения вяжущих с мелким заполнителем, состав вяжущего и температура изотермического прогрева, а также влияние технологических факторов на прочность и деформативные свойства бетона. Отмечается, что на прочность при сжатии мелкозернистого бетона в сухом и водонасыщенном состоянии наибольшее влияние оказывают температура пропаривания и количество заполнителя.

**Ключевые слова:** углекислый газ, эксплуатационная стойкость, карбонизация, цементирующие новообразования, закристаллизованность, деструктивные изменения, карбонизатор, деформативные свойства бетона, водонасыщение, водопоглощение, коэффициент размягчения, адгезия, модуль крупности заполнителя, стекловидные частицы, морозостойкость.

### ЧАСТЬ 5. ИЗУЧЕНИЕ КАРБОНИЗАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ВЯЖУЩЕГО

При эксплуатации строительные изделия подвергаются воздействию углекислого газа воздуха. В результате этого может существенно меняться характер цементирующих новообразований силикатного камня, что отражается на его эксплуатационной стойкости. В зависимости от концентрации углекислого газа, фазового состава новообразований, закристаллизованности и влажности материала карбонизация протекает с различной степенью интенсивности и сопровождается изменением прочности материала.

Силикатные материалы с желеобразными цементирующими веществами, новообразования которых характеризуются большой удельной поверхностью и высокой химической активностью, более интенсивно, чем кристаллические, взаимодействуют с углекислым газом. Силикатный камень на основе КИГШ-вяжущего, как показали наши исследования, имеет субмикроструктурную структуру с высокоразвитой удельной поверхностью цементирующих веществ. Поэтому его кар-

бонизация может проходить с большой скоростью, вызывая деструктивные изменения.

Можно предположить, что при определенном сочетании технологических факторов и параметров обработки разработанный материал будет стойким к воздействию углекислого газа. Для проверки этого предположения был запланирован и реализован четырехфакторный эксперимент. В качестве варьируемых технологических факторов приняты: содержание кека, шлиф-порошков, извести, гипса и температура пропаривания.

Для проведения исследований для каждой серии испытаний формовали по три образца-балочки размерами 4×4×16 см. Образцы карбонизировали в течение 400 ч при давлении углекислого газа в карбонизаторе 0,01 МПа, влажности 60–75 %, концентрации газа 95 %. После карбонизации образцы выдерживали в естественных условиях для выравнивания влажности, затем определяли усадку, пределы прочности при сжатии и изгибе, степень карбонизации. Последний показатель представляет собой процентное отношение закарбонизованной площади поперечного сечения ко всей площади образца. Закарбонизованную часть определяли по отсутствию малиновой окраски на поверхности свежеотколотого сечения образца при обработке фенолфталеином.

Анализируя полученные данные, можно отметить, что наиболее существенное влияние на свойства КИГШ-вяжущего после карбонизации оказывает изменение содержания в вяжущем негашеной извести. При его уменьшении с 20 до 10 % наблюдается резкое падение пределов прочности при сжатии и изгибе и увеличение усадочных деформаций.

\* Окончание. Части 1, 2 опубликованы в журнале «Новые огнеупоры» № 4 за 2016 г., часть 3 — в № 5 за 2016 г., часть 4 — в № 6 за 2016 г.



В. Н. Соков  
E-mail: sersok\_07@mail.ru

Повышение содержания извести до 30 % приводит к росту предела прочности при сжатии и снижению усадки. Так, после карбонизации предел прочности при сжатии  $\sigma_{сж}$  КИГШ-вяжущего по сравнению с  $\sigma_{сж}$  некарбонизованных образцов увеличился в 1,3–2,0 раза, усадка образцов с 30 % извести в зависимости от температуры пропаривания составила 0,61 мм/м. С повышением содержания негашеной извести сверх 20 % предел прочности при изгибе увеличивается. Однако в сравнении с  $\sigma_{изг}$  образцов, не прошедших карбонизацию, он значительно ниже.

Такой характер изменения свойств КИГШ-вяжущего в результате карбонизации объясняется следующим образом. Падение прочности в образцах с содержанием извести менее 20 % и особенно при 10 % обусловлено тем, что после пропаривания вся известь связана в новообразованиях, а так как ее указанное количество явно недостаточно для полного связывания кека и шлифпорошков, то формируется неплотный силикатный камень. Поэтому степень карбонизации образцов в этих сериях испытаний достигает максимальных значений. Так, в вяжущем с 10 % извести степень карбонизации 82 %, а с 20 % составляет 66–68 %.

По мере увеличения содержания негашеной извести все большая часть кека и шлифпорошков связывается в новообразования, поэтому камень получается более плотным. Карбонизации в первую очередь подвергается свободный СаО, а затем новообразования. При этом поверхностный слой образцов еще больше уплотняется. Это резко снижает степень и скорость карбонизации. Поскольку при карбонизации гидросиликатов выделяется гель кремнекислоты, склеивающей кристаллики карбонатов в монолит, то, естественно, растет и  $\sigma_{сж}$  КИГШ-камня. Однако наряду с этим в материале возникают большие напряжения, которые, повышая предел прочности при сжатии, снижают предел прочности при изгибе.

Анализируя влияние на свойства карбонизованных образцов других факторов, можно отметить, что влияние температуры изотермического прогрева менее значительно, хотя надо отметить, что наиболее сильное падение предела прочности при сжатии в случае малых добавок извести наблюдается в образцах, пропаренных при 90 °С. Не столь сильный рост при содержании в вяжущем 30 % извести.

Что касается влияния двуводного гипса на свойства образцов после карбонизации, то установлено, что наибольшая прочность в сериях с оптимальным соотношением между известью и гипсом.

Выполненные исследования показали, что в зависимости от состава вяжущего и параметров обработки карбонизация по-разному влияет на свойства КИГШ-вяжущего. Для получения стойкого к карбонизации материала необходимо, чтобы содержание извести в вяжущем было не менее 30 %, температура пропаривания была выше 90 °С, а оптимальное содержание гипса должно приниматься с учетом содержания негашеной извести.

## ЧАСТЬ 6. МЕЛКОЗЕРНИСТЫЙ БЕТОН НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ВЯЖУЩЕГО

Для получения бетона с различными свойствами исследовали соотношение вяжущее : заполнитель от 1:1 до 1:3. Состав вяжущего, %: кек 50, шлифпорошки 15, известь 30, гипс 5. Температуру изотермического прогрева изменяли от 80 до 100 °С.

Уровни варьирования независимых переменных и матрица планирования экспериментов аналогичны исследованиям силикатного камня (см. часть 3 статьи).

### Влияние технологических факторов на прочностные и деформативные свойства бетона

Проведены исследования следующих свойств бетона: пределов прочности при сжатии и изгибе, усадки при высушивании образцов после пропаривания и после водонасыщения, водопоглощения, коэффициента размягчения, морозостойкости. Показатели свойств мелкозернистого бетона, полученные в результате исследований, представлены на рис. 1 и 2.

При изучении мелкозернистого бетона соотношение между вяжущим и заполнителем с модулем крупности  $M = 0,8 \div 1,2$  варьировали от 1:1 до 1:3. В качестве заполнителя использовали частицы диаметром 0,63–2,5 мм от помола гипсовых форм. Режим пропаривания 2 + 8 + естественное охлаждение, температуру пропаривания изменяли от 80 до 100 °С.

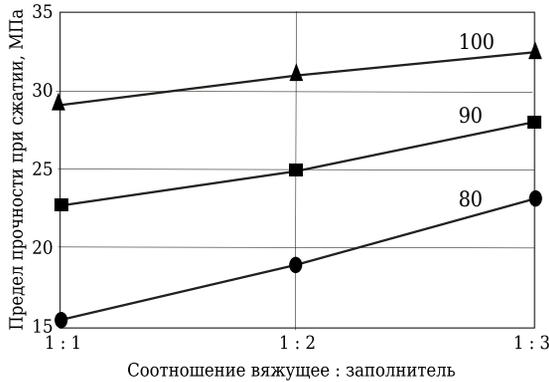
Установлено, что при использовании составов с оптимальным содержанием компонентов в вяжущем и соотношением вяжущее : заполнитель 1:2 получается наиболее прочный бетон.

Анализируя полученные результаты и сравнивая их с данными исследования КИГШ-вяжущего, можно отметить, что на прочность при сжатии мелкозернистого бетона в сухом и водонасыщенном состоянии наибольшее влияние оказывают температура пропаривания и количество заполнителя. При повышении температуры пропаривания с 80 до 100 °С предел прочности водонасыщенных образцов в некоторых сериях испытаний повысился почти в 9 раз и достиг 25 МПа. После высушивания при 105 °С  $\sigma_{сж}$  увеличился до 30 МПа. Наибольший прирост прочности наблюдается в бетоне с заполнителем, характеризующимся  $M = 1,2$  (рис. 1).

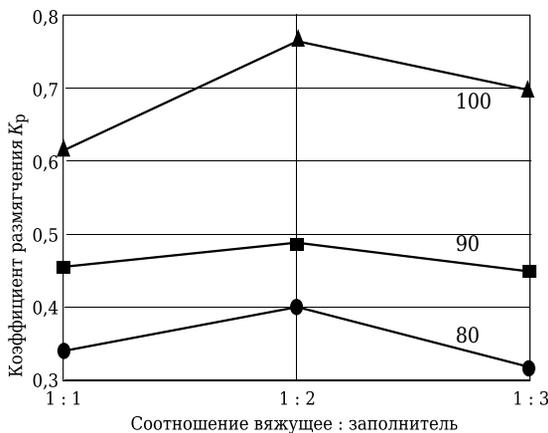
В сравнении с силикатным камнем в мелкозернистом бетоне наблюдается большое различие между пределами прочности при сжатии высушенных и водонасыщенных образцов. По нашему мнению, это связано, во-первых, с малым количеством вяжущего в бетоне, а во-вторых, с повышенной адгезией между заполнителем и вяжущим в случае водонасыщения.

Предел прочности при изгибе мелкозернистого бетона меньше, чем у КИГШ-камня. Однако если в последнем после высушивания этот показатель

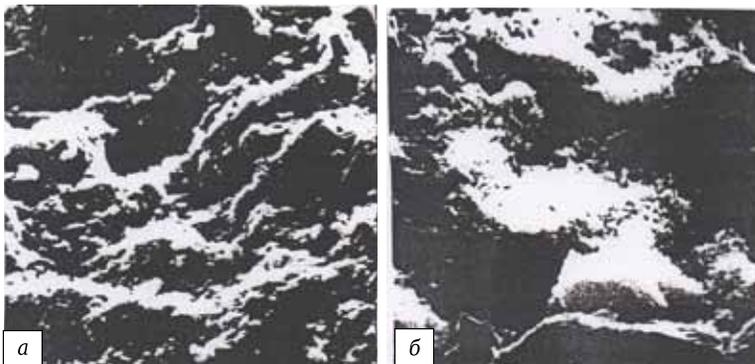
уменьшился во всех составах, то в бетоне с разным количеством заполнителя произошло изменение на разную величину. При увеличении количества заполнителя предел прочности при изгибе уменьшался, при снижении — увеличивался. Предел прочности при изгибе водонасыщенных образцов в зависимости от состава бетона и параметров обработки изменялся от 0,5 до 6,5 МПа.



**Рис. 1.** Влияние соотношения вяжущее : заполнитель на предел прочности при сжатии мелкозернистого бетона (модуль крупности заполнителя  $M = 1,2$ ). Температура пропаривания, °C, указана на кривых



**Рис. 2.** Влияние соотношения вяжущее : заполнитель на коэффициент размягчения мелкозернистого бетона (модуль крупности заполнителя  $M = 1,2$ ). Температура пропаривания указана на кривых



**Рис. 3.** Структура мелкозернистого бетона на КИГШ-вяжущем: а —  $\times 660$ ; б —  $\times 3000$ . Соотношение вяжущее : заполнитель 1 : 2

Такой характер изменения предела прочности при изгибе после высушивания связан с интенсивным протеканием процессов формирования гидратных соединений, вызывающих в материале большие напряжения. Введение меньшего количества заполнителя способствует частичному снятию напряжения, что положительно влияет на прочность при изгибе.

Анализируя влияние технологических факторов на предел прочности при изгибе мелкозернистого бетона, можно отметить, что наиболее значительно на этот показатель влияет изменение модуля крупности заполнителя в бетоне. Увеличение  $M$  с 0,8 до 1,2 при водонасыщении образцов способствует повышению их прочности, при высушивании — снижению. Для получения наибольшей прочности при изгибе необходимо, чтобы модуль крупности был не менее 1,0.

Повышение температуры пропаривания с 80 до 100 °C положительно влияет на  $\sigma_{изг}$ . Структура мелкозернистого бетона на КИГШ-вяжущем после 8 ч изотермической выдержки показана на рис. 3. Четко просматриваются стекловидные частички шлифпорошка, кека, а также кристаллы гидратных новообразований. Использовано КИГШ-вяжущее, содержащее, %: негашеной извести 30, гипса 5, шлифпорошков 15, кека 50.

Усадка мелкозернистого бетона в 1,5–2,0 раза меньше, чем у силикатного камня. Водопоглощение бетона в зависимости от состава вяжущего и температуры обработки 8,5–13,0 %.

Различный характер влияния заполнителя на усадку мелкозернистого бетона связан с его сильным набуханием в процессе водонасыщения. Это происходит из-за перехода свободного двуводрата и ангидрита в двуводный сульфат кальция. При небольшом количестве заполнителя такого набухания не наблюдается. В связи с этим для бетона, эксплуатируемого во влажных условиях, соотношение вяжущее : заполнитель не должно превышать 1:2.

Установлено, что стабилизация усадочных деформаций бетона наступает через 520 сут. Усадка материала к этому времени в зависимости от технологических факторов составляет 0,27–1,40 мм/м.

Выявлено, что при использовании вяжущего различного состава можно получить мелкозернистый бетон с пределом прочности при сжатии 35 МПа, при изгибе — до 6,5 МПа и морозостойкостью 35 циклов, характеризующих способность материала в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание без признаков разрушения. ■

Получено 03.03.16

© В. Н. Соков, С. Д. Сокова,  
В. В. Соков, 2016 г.