DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-8-17-25

Загороднюк Л.Х., *Рыжих В.Д., Махортов Д.С., Синебок Д.А.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
**E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru*

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА РАЗНЫХ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЯХ (ЧАСТЬ 2)

Аннотация. *Настоящая статья является продолжением предыдущей статьи и включает анализ формирования структуры гранулированных заполнителей при гидратации вяжущей композиции ВК-2 (ПЦ 500-Д0-Н + 20 % кварцевого песка), приготовленной в вихревой струйной мельнице. Выявлены особенности дисперсности кварцевого минерального наполнителя (фракций ≤0,16; ≤0,315; ≤0,63 мм) и основные закономерности влияния на структурообразование при гидратации вяжущих компонентов, отличающихся различным составом и дисперсностью частиц. В работе проведен анализ физико-механических испытаний образцов с наилучшими прочностными характеристиками, изучены особенности их микроструктур. В исследовании микроструктур образцов выявлены закономерности, заключающиеся в формировании кристаллических фаз разной плотности. Замечено, что введение 20 % минерального тонкодисперсного наполнителя в ПЦ 500-Д0-Н, в виде кварцевого песка, обеспечивает формирование плотных субмикрокристаллических гидратных фаз при использовании фракции наполнителя ≤0,63 мм, что способствует повышению прочности образцов более чем на 20 %; кроме того, отмечается, что минеральный наполнитель выполняет роль центров кристаллизации, связывая отдельные зерна заполнителей и уплотняя общую структуру композита. Установлено более плотное зарастание порового пространства композита мелкими кристаллическими новообразованиями гидросиликата кальция.*

Ключевые слова: *гранулированные заполнители, вяжущие композиции, микроструктура, гидратация, грануляция.*

Введение. Современные тенденции развития строительного кластера активно актуализируют идеи использования отходов промышленности и некондиционных материалов при производстве. Сегодня перед научным сообществом стоит задача расширения и внедрения новых технологий в области безотходного производства.

Оптимизация и эффективный ввод местного сырья в производство строительных материалов поможет увеличить экономию финансовых и трудовых средств, а также улучшит экологическую обстановку окружающей среды. Необходимо отметить, что данные проблемы носят глобальный характер и являются частью опасных природно-климатических изменений.

В настоящее время существует комплекс научных разработок [1–6] по совершенствованию и переопределению направлений в сфере безотходного производства, ведутся работы в сфере созданий композиционных вяжущих на основе отходов производств [7–9]. Считается, что одной из областей применения безотходного производства является строительная отрасль, так как производство строительных материалов с применением отходного сырья может в значительной степени раскрыть свой потенциал и использоваться в будущем на постоянной основе.

Строительная отрасль испытывает определенные трудности в связи с отсутствием мелких заполнителей, отвечающих требованиям ГОСТ, хотя имеются значительные объемы природных высокодисперсных кварцевых песков, которые нельзя использовать в строительстве.

Актуальной проблемой сегодня является недостаток того или иного сырья на площадках производств строительных материалов. Примечательно, что именно отсутствие стандартного общеприменяемого сырья (крупного и мелкого заполнителя) создает огромные проблемы для производства [9, 10]. Добыча крупных и мелких заполнителей не всегда может быть экономически и экологически обоснована, поэтому так важно вводить в практику производства новейшие научно-практические разработки.

Материалы и методы. Используемые материалы – портландцемент (ПЦ 500-Д0-Н), кварцевый песок (КП) фракций ≤0,16; ≤0,315; ≤0,63 мм; вода (В) ГОСТ 23732-2011.

Формование ГЗ производилось на основе вяжущей композиции №2 (ВК-2). ВК-2 получена путем совместного помола ПЦ=80 % и КП=20 % в вихревой струйной мельнице ВСМ-01 [11, 12].

Грануляция (экструзионное формование) ГЗ производилась на автоматической шнековой установке Mystery MGM-3000 с мощностью 3000 Вт. В ходе исследования получены 3 вида наиболее прочных гранулированных заполнителей (ГЗ) на основе ВК-2 и КП (фр. ≤0,16; ≤0,315; ≤0,63 мм). Набравшие прочность в течение 28 суток в воздушно-влажных условиях ГЗ заформованы с цементным тестом (в пропорциях по массе ГЗ:ПЦ:В = 1:1:0,5) [11, 12] в образцы-кубы 3×3×3

см. Подробная методология экструзионного формования ГЗ и проведения физико-механических испытаний на сжатие образцов приведена в научно-исследовательских работах [11, 12].

Микроскопические снимки сколов образцов-кубов 3×3×3 см, предварительно разрушенные на гидравлическом прессе ПГМ-50МГ4, выполнены на электронном микроскопе высокого разрешения Tescan Mira 3 LMU.

Основная часть. Исследования выполнены с целью изучения изменения микроструктуры при добавлении ВК-2 в разных пропорциях. Проведенные испытаний образцов на сжатие выявили образцы с наибольшей прочностью (табл. 1).

Таблица 1

Наиболее перспективные составы гранулированных заполнителей и их прочностные характеристики

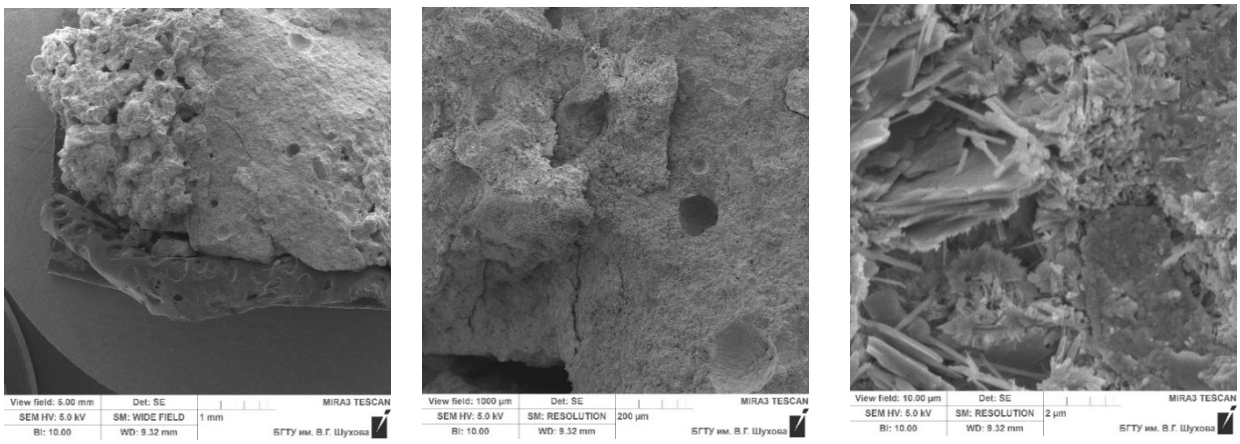
№ п/п	Шифр образцов с ГЗ	Прочность при сжатии, МПа	
		Средняя	Максимальная
1	Гранулированные заполнители с ВК-2 (рекомендуемые)		
1.1	0,16+15 % ВК-2	22,97	23,32
1.2	0,315+10 % ВК-2	19,1	19,5
1.3	0,63+10 % ВК-2	34,38	34,94
2	Гранулированные заполнители с ВК-2 (нерекомендуемые)		
2.1	0,16+5 % ВК-2	12,2	13,3
2.2	0,16+10 % ВК-2	18,1	19,5
2.3	0,315+5 % ВК-2	14,7	16,5
2.4	0,315+15 % ВК-2	18,9	19,1
2.5	0,63+5 % ВК-2	22,5	23,7
2.6	0,63+15 % ВК-2	28,2	29,1

Разносторонность процессов гидратации затрудняет систематизацию результатов прочностных испытаний только с физической точки зрения. Для полного систематического анализа необходимо изучение микроструктуры гранулированных заполнителей и областей контактных слоев ГЗ с цементным тестом.

Изучая мезоструктуру контактного слоя ГЗ 0,16+15 % ВК-2 с цементным камнем, отмечается структурная пористость с размерами пор от 0,08 до 0,5 мм. Такие факторы, как водоцементное отношение вяжущей композиции, дисперсность кварцевого песка и процент добавления ВК-2 в ГЗ определяют порообразование и их величину. Высокая удельная поверхность частиц кварцевого песка (≤0,16 мм) понижает степень проникновения цементного теста в структуру ГЗ при замесе композитного раствора, при этом, ослабляя структурную связанность и понижая физико-механические характеристики системы. Микроструктурный анализ контактного слоя свидетельствует о высокой степени гидратации цементного теста с образованием кристаллов пластинчатой, призматической и чешуйчатой формы (рис. 1, в). Общий структурный вид – смешанный, характеризующийся наличием блочно-ритмических образований (блоков-агрегатов) и содержанием зернистой структуры [12, 13]. В области контактного слоя образца с шифром 0,16+15 % ВК-2 наблюдаются прорастания параллельно ориентированных и сросшихся гексагональных пластинчатых кристаллов гидроалюминатов и гидроалюмоферритов кальция. Отмечается обрастание частиц кварцевого песка и поверхностей пор мелкокристаллическими образованиями в виде бахромы и параллельно ориентированными чешуйчатыми поликристаллами гидросиликатов кальция. На поверхности скола наблюдается формирование разноориентированных призматических кристаллов гидрооксида кальция с малыми игольчатыми кристаллообразованиями алюминийсодержащих минералов. Следует отметить, что компонентный состав ГЗ с шифром 0,16+15 % ВК-2 показал одну из наибольших прочностей в данном виде композиционного заполнителя. Микроструктура контактного слоя образца шифра 0,16+15 % ВК-2 свидетельствует о плотном компактном расположении частиц заполнителя и вяжущего компонента.

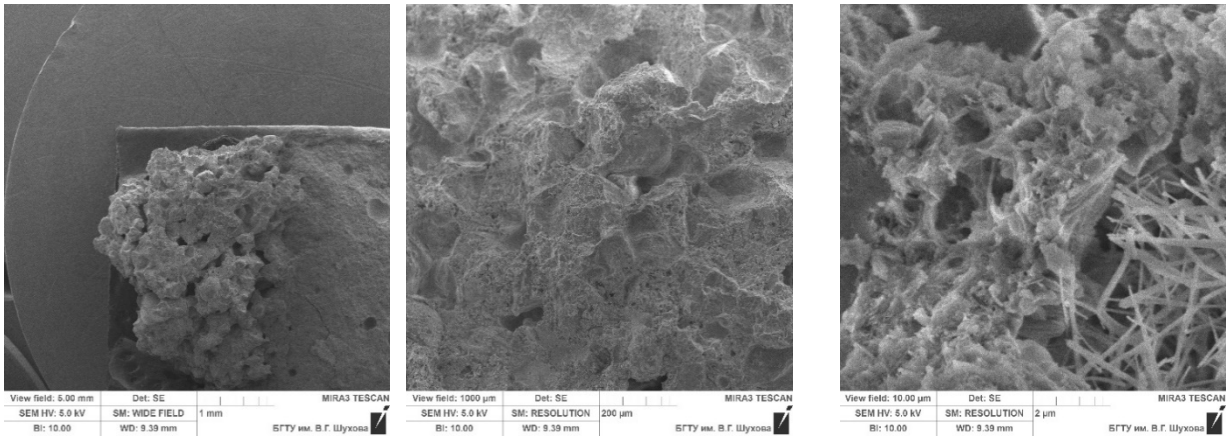
ГЗ с шифром 0,16+15 % ВК-2 в зоне скола имеют пористую структуру, с размерами пор 0,05–0,1 мм (рис. 2). Отчетливо просматривается формирование зернистой структуры на рис. 2, б. Микроструктура характеризуется как смешанная, состоящая из отдельных блоков-агрегатов и скелетной структуры кристаллических образований гидросиликатов кальция. Смешанная структура имеет различную морфологию [14–17]. На микроснимке (рис. 2, в) наблюдается активное формирование пластинчатых (чешуйчатых) поликристаллов на поверхности частиц заполнителя и в межчастичном пространстве. Отчетливо просматривается срастание отдельных чешуек с

образованием кристаллоагрегатов сложной формы. Концентрическое расположение кристаллических образований гидросиликатов кальция в отдельных блоках-агрегатах наглядно показывает частичную ритмичность микроструктуры в ГЗ, образованной от ВК-2 с шаровидно-элипсоидной формой частиц [14]. В отдельных областях обнаружено формирование гидратационных центров, образованных путем обрастания дисперсных кварцевых песчинок кристаллической массой. Примечательно, что в поровом пространстве (рис. 2, в) наблюдается активное зарастание игольчатыми кристаллами гидросульфоалюмината кальция, которые связывают блоки-агрегаты в единую структурную систему. Анализ изученных структур дает полные основания, что с возрастом скелетная структура композита будет уплотняться, за счет кристаллизации новообразований по всему объема композита и в порах.



(а) 5 мм (б) 1000 мкм (в) 10 мкм

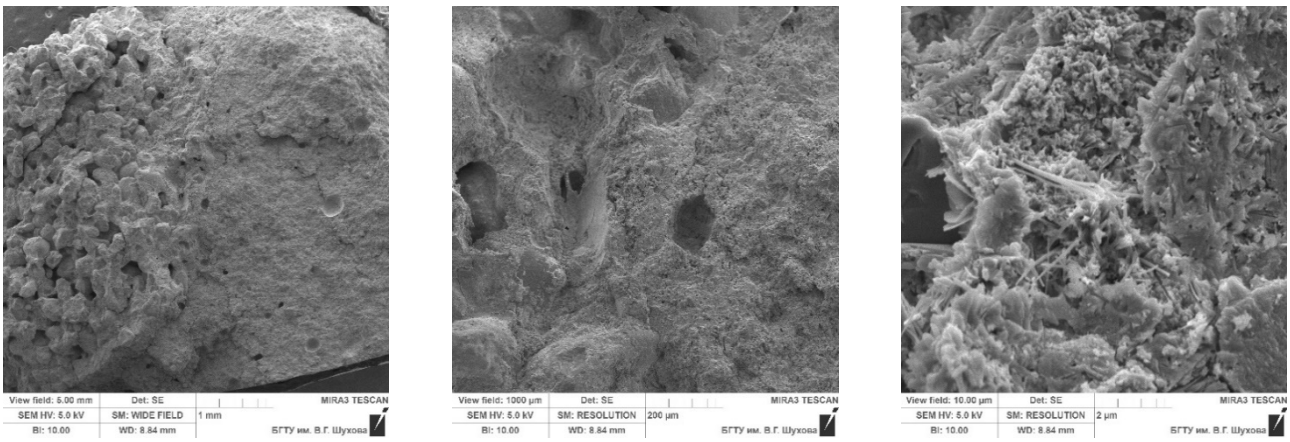
Рис. 1. Микроструктура контактного слоя гранулированных заполнителей 0,16+15 % ВК-2



(а) 5 мм (б) 1000 мкм (в) 10 мкм

Рис. 2. Микроструктура поверхности сколагранулированных заполнителей 0,16+15 % ВК-2

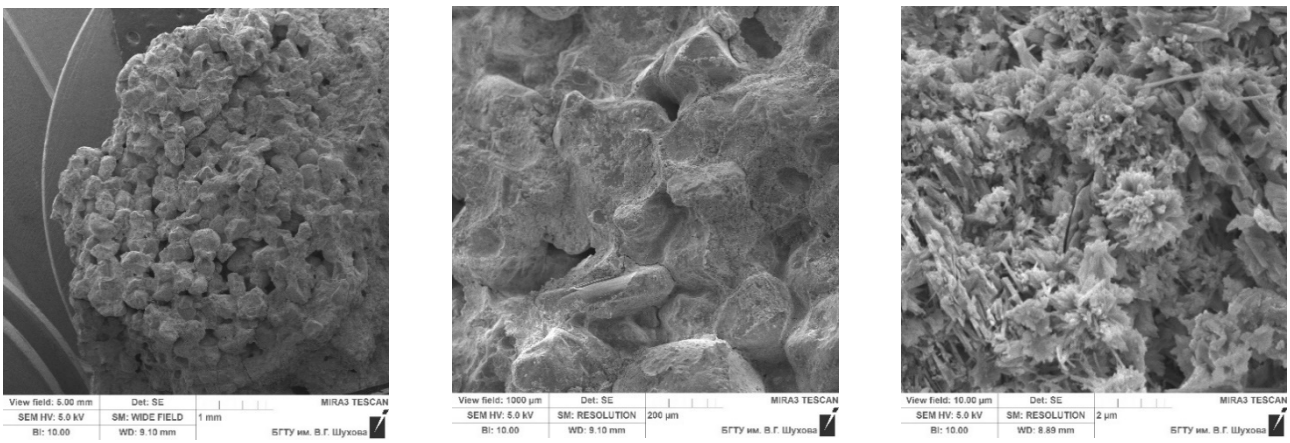
Микроструктура контактного слоя образца шифра 0,315+10 % ВК-2 (рис. 3, а) представляет собой плотную зернистую структуру с включениями небольшого количества пор размерами от 0,01 до 0,07 мм. Глубина контактного слоя достигает величины до 1 мм, что свидетельствует о высокой степени интеграции ГЗ в компонентном составе с цементным тестом. Структура контактного слоя – агрегатно-ритмическая, с обрастанием частиц заполнителя призматическими и чешуйчатыми поликристаллами гидросиликатов кальция, а также образованиями гексогональных пластинчатых кристаллов портландита и гидроалюминатов кальция. По всей поверхности скола контактной зоны (рис. 3, в) наблюдаются плотные наслоения кристаллических образований, а также прорастание кристаллической фазы в трещины и поровое пространство. Необходимо отметить, что полного зарастания трещин и пор не наблюдается. Поры и трещины четко просматриваются даже в образцах полугодичной давности. Ориентация и размерность кристаллических структур ограничиваются размерами блока. Большое количество кристаллических образований имеет форму шестиугольных призм с зазубринами, свидетельствующими о их слоистом строении [18]. Параллельная слоистость на одних участках снимка (рис. 3, в) выявляется очень четко, на других – менее четко, на третьих – не устанавливается совсем.



(а) 5 мм (б) 1000 мкм (в) 10 мкм

Рис. 3. Микроструктура контактного слоя гранулированных заполнителей 0,315+10 % ВК-2

Изучая микроструктуру ГЗ с шифром 0,315+10 % ВК-2 (рис. 4), следует отметить пористую структуру с размерами пор от 0,01 до 0,2 мм. На поверхности скола ГЗ наблюдается активное обрастание частиц кварцевого песка чешуйчатыми поликристаллами гидросиликатов кальция. Кристаллические образования состоят из отдельных блоков-агрегатов. Структура – агрегатно- или блочно-ритмическая. Ориентация роста кристаллов на одних областях снимка параллельно слоистая, на других разноориентированная. Разные участки поверхности скола ГЗ с шифром 0,315+10 % ВК-2 имеют разную морфологию: на одних участках структура представлена параллельно сросшимися кристаллическими пакетами волокон гидросиликатов кальция [11, 12], на других разноориентированными призматическим кристаллами эттрингита или гидроксида кальция, на третьих небольшим количеством гексагональных пластинчатых кристаллов алюмосодержащих минералов. Необходимо отметить, что четко просматриваются субмикрокристаллические формирования в виде бахромы [16], наблюдается ряд отдельных мелких блоков-агрегатов кристаллической фазы, вероятнее всего образованных путем обрастания частиц наполнителя вяжущей композицией.

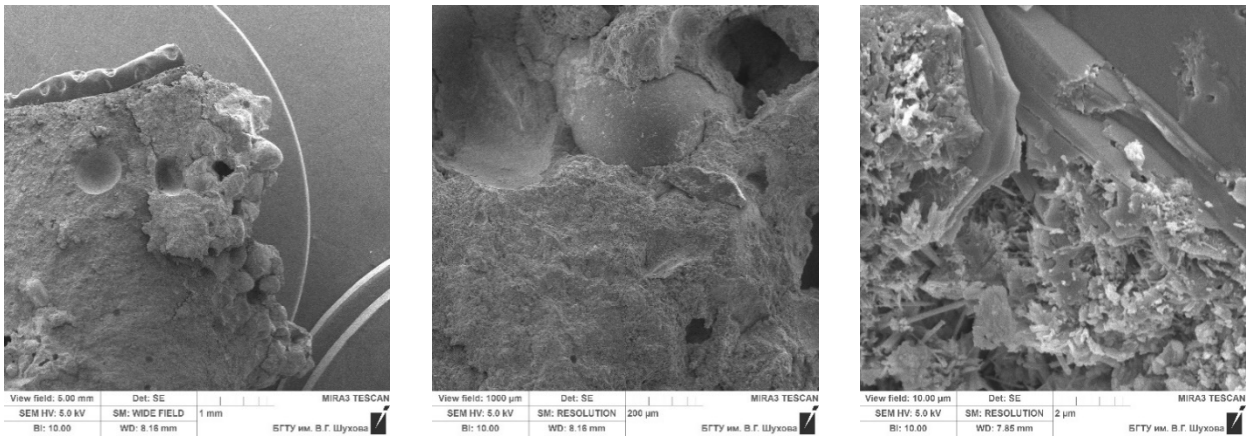


(а) 5 мм (б) 1000 мкм (в) 10 мкм

Рис.4. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,315+10 % ВК-2

Структура контактного слоя ГЗ с шифром 0,63+10 % ВК-2 (рис. 5) представлена компактным расположением частиц заполнителя и цементного теста. Благодаря высокой открытой пористости ГЗ (размеры пор от 0,01 до 0,5 мм) достигается достаточно большая степень интеграции цементного теста в структуру ГЗ с фракцией кварцевого песка ≤0,63 мм, вследствие чего образуется плотная структура контактного слоя. Разрабатываемые ГЗ должны иметь шероховатую поверхность для увеличения адгезии для вяжущего и создания прочных цементных растворов. Наличие развитой шероховатой поверхности ГЗ, включающих фракцию песка ≤0,315 мм и ВК-2, имеющую в своем составе портландцемент и молотый кварцевый песок создают прочный компо-

зит за счет сродства структур и прорастания кристаллов гидросиликатов в общем объеме раствора или бетона. Поверхность скола контактного слоя ГЗ и цементного теста наглядно показывает формирование кристаллической фазы вокруг частицы заполнителя. Отчетливо видно формирование пластинчатой формы кристаллов гидроалюминатов кальция с одновременным прорастанием чешуйчатых кристаллических новообразований гидросиликатов кальция (рис. 5, в) [15]. Структурный вид – блочно-ритмический с формированием разноориентированных блоков-агрегатов различной формы. Следует отметить, что плотность формирования кристаллов у поверхностей частиц заполнителя значительно выше, чем в общем объеме, что объясняется периодическим изменением концентрации раствора из-за различной диффузии воды к исходным зернам цемента через слой новообразований [17]. Изучение зоны контактного слоя свидетельствует об активном зарастании микропор и уплотнении структуры кристаллическими образованиями.



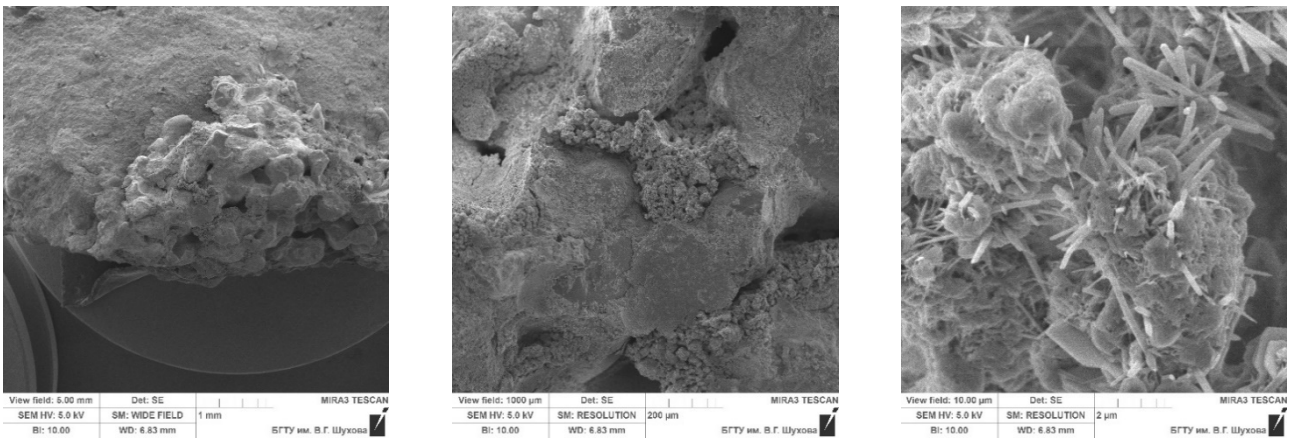
(а) 5 мм (б) 1000 мкм (в) 10 мкм

Рис. 5. Микроструктура контактного слоя гранулированных заполнителей 0,63+10 % ВК-2

На микрофотографиях (рис. 6) поверхности скола ГЗ с шифром 0,63+10 % ВК-2 отчетливо видно формирование кристаллических образований в межчастичном пространстве ГЗ. Общий структурный вид ГЗ шифра 0,63+15 % КВ-2 – агрегатно- или блочно-ритмический, с формированием блоков-агрегатов различной морфологии. По морфологическим признакам кристаллические образования в ГЗ подразделяются на несколько видов: первый – пластинчатые (чешуйчатые) поликристаллы гидросиликатов кальция [18], формирующиеся на поверхности частиц кварцевого песка; второй – блочно-агрегатные образования с формированием гескогональных пластинчатых кристаллов гидроалюминатов кальция, чешуйчатых поликристаллов гидросиликатов кальция, призматических игольчатых кристаллов эттрингита [15], а также (возможно) местами образование больших призматических кристаллов гидрооксида кальция. Микроструктура ГЗ характеризируется, как пористая, с активным прорастанием игольчатых кристаллов эттрингита в межагрегатно-блочном пространстве. Формирование кристаллической структуры определяется разной направленностью. Параллельная слоистость кристаллов не выявлена. Следует отметить, что наибольшей прочностью при сжатии обладает образец с ГЗ шифра 0,63+10 % ВК-2, что свидетельствует об эффективности использования кварцевого песка фракции ≤0,63 мм, при использовании которого формируются оптимальные структурные системы и поровые пространства.

Изучая микроструктуру разных ГЗ с вяжущей композицией ВК-2 и в различных контактных слоях, следует отметить, что механизм гидратации во всех видах образцов одинаков. Отличие стоит только в скорости гидратации силикатов кальция, зависящей от тонкости помола и концентрации минералов клинкера в тех или иных зонах объема. Во всех случаях первоначально образуется алюмоферритная структура, на фоне которой развивается силикатная.

Изучение микроструктуры поверхностей сколов образцов с ГЗ показало, что все образцы имеют разную структуру (смешанную, блочно-ритмическую и зернистую). Разные участки поверхностей сколов образуют визуальное представление о бесформенной массе, но при детальном рассмотрении выявляется их структурность. Выявлено, что все частицы заполнителя во всех видах образцов покрыты субмикрокристаллическими образованиями в виде бахромы. Такие образования свидетельствуют о наличии дополнительных субмикрокристаллических гидратных фазах, уплотняющих структуру образцов.



(а) 5 мм (б) 1000 мкм (в) 10 мкм

Рис. 6. Микроструктура поверхности сколагранулированных заполнителей 0,63+10 % ВК-2

В ходе исследования выявлены наиболее перспективные ГЗ с шифром 0,63+10 % ВК-2. Таким образом, использование гранулированных заполнителей на основе кварцевых песков фракций ≤0,16 мм и ≤0,315 мм, с целью достижения наибольших прочностных показателей композиционных растворов, является неэффективным.

Выводы.

1. Структурообразование различных ГЗ, приготовленных на вяжущих композициях ВК-2 с содержанием ПЦ=80 % и КП=20 % в объеме и кварцевыми песками разной дисперсности имеют свои отличительные особенности. Гранулированные заполнители на основе песков фракции ≤0,63 мм и ВК-2 (в количестве 10 %) обладают высокой прочностью (34,38 МПа) и характеризуются плотной структурой с зарастанием порового пространства композита.

2. Установлено, что наиболее плотной структурой прорастания кристаллической фазы обладают ГЗ с шифрами 0,315+10 % ВК-2 и 0,63+10 % ВК-2. Необходимо отметить, что за счет высокой пористости и увеличенной адгезионной способности ГЗ с шифром 0,63+10 % ВК-2 в композиции с цементным тестом образуют плотную структуру композита, при которой прочность образцов увеличивается на 20 % и более от прочности образцов с использованием КП фракции ≤0,315мм.

3. Установлено, что микроструктуры поверхностей сколов всех образов имеют плотную структуру. Выявлено, что все частицы заполнителя во всех видах образцов покрыты субмикрокристаллическими образованиями в виде бахромы, что свидетельствует о наличии дополнительных гидратных фаз, уплотняющих структуру образцов, что в конечном счете подтверждается результатами физико-механических испытаний.

Источник финансирования. *РФФИ научно-исследовательского проекта № 18-29-24113 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Aljasimee D.H., Dhaheer M.S.A. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating PVA-treated recycled aggregate // Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 671. 012103.

2. Cabrera-Covarrubias F., Gomez-Soberon J.M., Almaral-Sanchez J.L., Arredondo-Rea S.P., Gomez-Soberon M.C., Corral-Higuera R. An Experimental Study of Mortars with Recycled Ceramic Aggregates: Deduction and Prediction of the Stress-Strain // Materials. 2016. Vol. 9, № 12. 1029.

3. Palovčík J., Opravil T., Novotný R., Másilko J. Application of brick grind dust in systems based on Portland cement // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 379. 012002.

4. Shapovalov N.A., Shchekina A. Yu., Gorodov A.I. Modified binders on the basis of flotation tailings // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 327. 032050.

5. Tchamdjou W.H.J., Grigoletto S., Michel F., Courard L., Abidi M.L., Cherradi T. An investigation on the use of coarse volcanic scoria as sand in Portland cement mortar // Case Studies in Construction Materials. 2017. Vol. 7. Pp. 191–206.

6. Thomas C., Cimentada A.I., Cantero B., Saez del Bosque I.F., Polanco J.A. Industrial Low-Clinker Precast Elements Using Recycled Aggregates // Applied Sciences. 2020. Vol. 10, № 19. 6655.

7. Загороднюк Л.Х., Сумской Д.А., Чепенко А.С. Особенности процессов гидратации высокодисперсных вяжущих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 12. С.105–113.

8. Yüksel I., Genç A. Properties of Concrete Containing Nonground Ash and Slag As Fine Aggregate // ACI Materials Journal. 2007. Vol. 37. P. 8.

9. Miller S.A. The role of cement service-life on the efficient use of resources // Environ. Res. Lett. 2020. Vol. 15, № 2. 024004.

10. Courard L., Rondeux M., Zhao Z., Michel F. Use of Recycled Fine Aggregates from C&DW for Unbound Road Sub-Base // Materials. 2020. Vol. 13, № 13. 2994.

11. Zagorodnyuk L.H., Ryzhikh V.D., Makhortov D.S., Sumskoy D.A. Method of Extrusion Granulation of Aggregates for the Preparation of Filling Mixtures // Innovations and Technologies in Construction. Cham: Springer International Publishing. 2021. Vol. 151. Pp. 22–28.

12. Lesovik V., Zagorodnyuk L., Ryzhikh V., Lesovik R., Fediuk R., Vatin N., Karelina M. Granular Aggregates Based on Finely Dispersed Substandard Raw Materials // Crystals. 2021. Vol. 11, № 4. 369.

13. Feng Y. Hydration and strength development in blended cement with ultrafine granulated copper slag // PLoS ONE ed. Pimraksa K. 2019. Vol. 14, № 4. e0215677.

14. Wu J., Wang L., Meng L. Analysis of mineral composition and microstructure of gravel aggregate based on XRD and SEM // Road Materials and Pavement Design. 2017. Vol. 18, № 3. Pp. 139–148.

15. An J., Kim S.S., Nam B.H., A. Durham S. Effect of Aggregate Mineralogy and Concrete Microstructure on Thermal Expansion and Strength Properties of Concrete // Applied Sciences. 2017. Vol. 7, № 12. 1307.

16. Zitouni K., Djerbi A., Mebrouki A. Study on the Microstructure of the New Paste of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete // Materials. 2020. Vol. 13, № 9. 2114.

17. Rao M., Wei J., Gao Z., Zhou W., Li Q., Liu S. Study on Strength and Microstructure of Cement-Based Materials Containing Combination Mineral Admixtures // Advances in Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–10.

18.Hodul J., Žižková N., Borg R.P. The Influence of Crystalline Admixtures on the Properties and Microstructure of Mortar Containing By-Products // Buildings. 2020. Vol. 10, № 9. 146.

Информация об авторах

Загороднюк Лилия Хасановна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: LHZ47@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Рыжих Владислав Дмитриевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Махортов Денис Сергеевич, аспирант кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: mahortov1995@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Синебок Дарья Александровна, магистрант кафедры безопасности жизнедеятельности. E-mail: rd_work00@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 12.04.2021 г.

© Загороднюк Л.Х., Рыжих В.Д., Махортов Д.С., Синебок Д.А., 2021

Zagorodnyuk L.Kh., *Ryzhikh.V.D., Makhortov D.S., Sinebok D.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru*

SPECIFIC FEATURES OF THE FORMATION OF THE MICROSTRUCTURE OF GRANULAR AGGREGATES ON DIFFERENT BINDING COMPOSITIONS (PART 2)

Abstract. *This article is a continuation of the previous research. It includes analysis of the formation of the structure of granular aggregates during the hydration of the binder composition of BC-2 (PC 500-D0-N + 20 % quartz sand), prepared in a jet vortex mill. The study reveals the features of the dispersion of the quartz mineral filler (fractions ≤0.16; ≤0.315; ≤0.63 mm) and the main patterns of influence on structure formation at hydration of binders, differing in the composition and dispersion of particles. The paper analyzes physical and mechanical tests of the samples with the best strength characteristics and studies the features of their microstructures. The study of the microstructures of the samples reveals regularities, consisting in the formation of crystalline phases of different densities. It is noted that the introduction of 20 % mineral finely*

dispersed filler into PC 500-D0-N, in the form of quartz sand, ensures the formation of dense sub-microcrystalline hydrate phases when using a filler fraction ≤0.63 mm, which contributes to an increase in the additional strength of the samples by more than 20 %. It has been found that the mineral filler plays the role of crystallization centers, binding individual grains of fillers and sealing general structure of the composite. More compact healing of the pore space has been established for the composite with small crystalline new formations of hydrated calcium silicate.

Keywords: *granulated fillers, binding compositions, microstructure, hydration, extrusion.*

REFERENCES

1. Aljasimee D.H., Dhaheer M.S.A. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete incorporating PVA-treated recycled aggregate. Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 671. 012103.

2. Cabrera-Covarrubias F., Gomez-Soberon J.M., Almaral-Sanchez J.L., Arredondo-Rea S.P., Gomez-Soberon M.C., Corral-Higuera R. An Experimental Study of Mortars with Recycled Ceramic Aggregates: Deduction and Prediction of the Stress-Strain. Materials. 2016. Vol. 9, No. 12. 1029.

3. Palovčík J., Opravil T., Novotný R., Másilko J. Application of brick grind dust in systems based on Portland cement. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 379. 012002.

4. Shapovalov N.A., Shchekina A. Yu., Gorodov A.I. Modified binders on the basis of flotation tailings. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2018. Vol. 327. P. 032050.

5. Tchamdjou W.H.J., Grigoletto S., Michel F., Courard L., Abidi M.L., Cherradi T. An investigation on the use of coarse volcanic scoria as sand in Portland cement mortar. Case Studies in Construction Materials. 2017. Vol. 7. Pp. 191–206.

6. Thomas C., Cimentada A.I., Cantero B., Saez del Bosque I.F., Polanco J.A. Industrial Low-Clinker Precast Elements Using Recycled Aggregates. Applied Sciences. 2020. Vol. 10, № 19. 6655.

7. Zagorodnyuk L.H., Sumskoy D.A., Chepenko A.S. Features of the processes of hydration of highly dispersed binders [Osobennosti processov gidratacii vysokodispersnyh vyazhushchih]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. No. 12. Pp. 105–113. (rus)

8. Yüksel I., Genç A. Properties of Concrete Containing Nonground Ash and Slag As Fine Aggregate. ACI Materials Journal. 2007. Vol. 37. P. 8.

9. Miller S.A. The role of cement service-life on the efficient use of resources. Environ. Res. Lett. 2020. Vol. 15, No. 2. P. 024004.

10. Courard L., Rondeux M., Zhao Z., Michel F. Use of Recycled Fine Aggregates from C&DW for Unbound Road Sub-Base. Materials. 2020. Vol. 13, No. 13. 2994.

11. Zagorodnyuk L.H., Ryzhikh V.D., Makhortov D.S., Sumskoy D.A. Method of Extrusion Granulation of Aggregates for the Preparation of Filling Mixtures. Innovations and Technologies in Construction. Cham: Springer International Publishing. 2021. Vol. 151. Pp. 22–28.

12. Lesovik V., Zagorodnyuk L., Ryzhikh V., Lesovik R., Fediuk R., Vatin N., Karelina M. Granular Aggregates Based on Finely Dispersed Substandard Raw Materials. Crystals. 2021. Vol. 11, No. 4. 369.

13. Feng Y. Hydration and strength development in blended cement with ultrafine granulated copper slag. PLoS ONE ed. Pimraksa K. 2019. Vol. 14, No. 4. e0215677.

14. Wu J., Wang L., Meng L. Analysis of mineral composition and microstructure of gravel aggregate based on XRD and SEM. Road Materials and Pavement Design. 2017. Vol. 18, No. 3. Pp. 139–148.

15. An J., Kim S.S., Nam B.H., A. Durham S. Effect of Aggregate Mineralogy and Concrete Microstructure on Thermal Expansion and Strength Properties of Concrete. Applied Sciences. 2017. Vol. 7, No. 12. 1307.

16. Zitouni K., Djerbi A., Mebrouki A. Study on the Microstructure of the New Paste of Recycled Aggregate Self-Compacting Concrete. Materials. 2020. Vol. 13, No. 9. 2114.

17. Rao M., Wei J., Gao Z., Zhou W., Li Q., Liu S. Study on Strength and Microstructure of Cement-Based Materials Containing Combination Mineral Admixtures. Advances in Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 2016. Pp. 1–10.

18. Hodul J., Žižková N., Borg R.P. The Influence of Crystalline Admixtures on the Properties and Microstructure of Mortar Containing By-Products. Buildings. 2020. Vol. 10, No. 9. 146.

Information about the authors

Zagorodnyuk, Liliya Kh. DSc, Professor. E-mail: LHZ47@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Ryzhikh, Vladislav D. Postgraduate student. E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Makhortov, Denis S. Postgraduate student. E-mail: mahortov1995@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Sinebok, Darya A. Master student. E-mail: rd_work00@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 12.04.2021

Для цитирования:
Загороднюк Л.Х., Рыжих В.Д., Махортов Д.С., Синебок Д.А. Особенности формирования микроструктуры гранулированных заполнителей на разных вяжущих композициях (Часть 2) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 8. С. 17–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-8-17-25

For citation:
Zagorodnyuk L.Kh., Ryzhikh V.D., Makhortov D.S., Sinebok D.A. Specific features of the formation of the microstructure of granular aggregates on different binding compositions (Part 2). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 8. Pp. 17–25. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-8-17-25