

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-20-27

**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 3)

**Аннотация.** Представленная статья является логическим продолжением результатов исследований, изложенных в предыдущей публикации, и отражает результаты исследований по влиянию вяжущей композиции №3 (ВК-3) на формирования микроструктуры и физико-механические свойства гранулированных заполнителей. В результате теоретического анализа установлено, что плотное зарастание кристаллической массой пор гранулированных заполнителей осуществляется при добавлении ВК-3 в количестве 15 % не зависимо от фракционного состава кварцевого песка. Установлено, что плотность кристаллических образований, отображающих микроструктуру образцов, напрямую влияет на физико-механические показатели композитов. На дисперсных микронаполнителях формируется, как на подложках, густая микрокристаллическая структура новообразований гидросиликатов кальция. Добавление 15 % вяжущей композиции №3 (ВК-3) в компонентный состав гранулированных заполнителей обеспечивает стабильность физико-механических показателей и позволяет рекомендовать их для использования в качестве крупных заполнителей при приготовлении растворных смесей специального назначения.

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

**Введение.** Сегодня перед научным сообществом всего мира стоит ряд глобальных нерешенных проблем, связанных с загрязнением окружающей среды. Решение данных проблем требует проведения углублённого многогранного анализа.

Каждый день растёт масштаб строительства и производства строительных материалов; нехватка строительного сырья на тех или иных территориях уменьшает экономическую эффективность производства с использованием стандартных материалов. Лишь единицы предприятий оптимизируют свою работу и вводят в производственный процесс современные разработки научного сообщества.

На данный момент одной из глобальных экологических проблем является хранение некондиционного сырья на открытых площадках, в результате чего происходит выветривание и загрязнение атмосферы [1, 2]. Именно применение некондиционного сырья в технологии производства строительных материалов поможет снизить риски загрязнения природы и увеличить экономическую эффективность. Существует ряд актуальных разработок в области производства строительных материалов с использованием техногенных некондиционных материалов и отходов производств [1–9], целью которых является создание высокоэффективных композиционных вяжущих [7–9] и заполнителей [10–12].

Условия производства строительных материалов на различных участках всегда разные, поэтому так важно приспосабливаться к определен-

ным обстоятельствам и требованиям. Существует проблема нехватки крупных и мелких заполнителей на тех или иных территориях, являющаяся основополагающей в процессе спада экономической эффективности производства. Создание искусственных заполнителей необходимых фракций, с возможностью воспроизводства на любой территории мира – важная задача для научного сообщества.

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

Формование гранулированных заполнителей (ГЗ) производилось на основе вяжущей композиции №3 (ВК-3). ВК-3 получена путем совместного помола ПЦ=70 % и КП=30 % 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-3 и КП (фр.  $\leq 0,16$ ;  $\leq 0,315$ ;  $\leq 0,63$  мм). Набравшие прочность в течение 28 суток в воздушно-влажностных условиях ГЗ заформованы с цементным тестом (в пропорциях по массе ГЗ:ПЦ:В = 1:1:0,5) [11, 12] в образцы-кубы  $3 \times 3 \times 3$  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  $3 \times 3 \times 3$  см, предварительно разрушенные на гидравлическом прессе ПГМ-50МГ4, выполнены на электронном микроскопе высокого разрешения Tescan Mira 3 LMU.

**Основная часть.** Лабораторные исследования проводились с целью определения влияния наполнителя (кварцевого песка) на прочностные

характеристики ГЗ. Изменение объема добавления ВК-3 в ГЗ с 5 до 15 % увеличивает физико-механические показатели прочности всей системы. Проведение микроструктурного анализа проводилось только для наиболее перспективных образцов обладающих 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-3 (рекомендуемые)		
1.1	0,16+15 % ВК-3	25,37	25,89
1.2	0,315+15 % ВК-3	26,66	27,14
1.3	0,63+15 % ВК-3	26,98	27,59
2	Гранулированные заполнители с ВК-3 (не рекомендуемые)		
2.1	0,16+5 % ВК-3	15,42	15,27
2.2	0,315+5 % ВК-3	20,31	21,38
2.3	0,63+5 % ВК-3	20,65	22,06
2.4	0,16+10 % ВК-3	15,08	15,32
2.5	0,315+10 % ВК-3	18,37	19,01
2.6	0,63+10 % ВК-3	23,7	24,46

Исследование микроструктуры гранулированных заполнителей проводилось в областях контактного слоя ГЗ с цементным тестом и в зонах среза ядра ГЗ.

Микроструктура контактного слоя ГЗ с шифром 0,16+15 % ВК-3 (рис. 1) пористая, состоящая из отдельных блоков-агрегатов, сформированными кристаллическими образованиями разной ориентации. Размеры пор находятся в пределах 0,01–0,1 мм. Микроструктура контактного слоя характеризуется основными структурообразующими элементами: кристаллический сросток [13], не до конца гидратированные зерна портландцемента, тоберморитовый гель, поровое пространство, зерна наполнителя и зерна заполнителя. Величина интеграции цементного теста в ГЗ в области контактного слоя ограничивается низкой дисперсностью, высокой удельной поверхностью и малыми размерами поровых пространств кварцевых песков  $\leq 0,16$  мм. Отчетливо прослеживаются образования чешуйчатых поликристаллов гидросиликатов кальция (рис. 1, в). Замечены множественные формирования призматических кристаллов, вероятнее всего, образованные гидроксидом кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . На некоторых участках пор наблюдается формирование игольчатых кристаллов гидросульфаталюминатов кальция. Отчетливо просматривается обрастание зерен наполнителя, создающих гидратационные центры. Общий структурный вид – блочный, с формированием разноориентированной кристаллической фазы. Слоистость образования кристаллов на одних участках определяется менее четко,

на других нечетко. Несмотря на все вышеизложенные факторы, структура контактного слоя является плотной с достаточно широкой морфологией образования кристаллов.

Микроструктурный анализ поверхности скола ГЗ с шифром 0,16+15 % ВК-3 (рис. 2) показывает, что образец имеет высокопористую структуру с размерами пор 0,01 – 0,1 мм. Мезоструктура ГЗ 0,16+15 % ВК-3 (рис. 2, а, б) зернистая, с плотными кристаллическими обрастаниями зерен заполнителя и наполнителя [14–16]. Отмечается, что мелкодисперсные зерна наполнителя в составе вяжущей композиции ВК-3 уплотняют структуру ГЗ путем формирования дополнительных субмикроструктурных гидратных фаз. Микроструктура ГЗ с шифром 0,16+15 % ВК-3 состоит из отдельных блоков-агрегатов (рис. 2, в), образованных разноориентированными кристаллами различной формы при гидратации клинкерных минералов. Кристаллическая фаза ГЗ на основе вяжущего ВК-3 представлена блоками в виде гексагональных пластинчатых кристаллов гидроалюминатов кальция, в некоторых местах сросшихся в двойниковом положении в результате геометрического отбора растущих кристаллов. Наблюдаются формирования чешуйчатых поликристаллов гидросиликатов кальция с параллельными образованиями игольчатых кристаллов эттрингита на поверхности блоков-агрегатов. Форма блока определяет ориентацию роста кристаллов. Отчетливо

видны активные прорастания кристаллов эттрингита в микропоровом и межблочном пространстве, увеличивающие плотность и прочность ГЗ.

Методом электронной микроскопии исследована микроструктура области контактного слоя ГЗ с шифром 0,315+15 % ВК-3 и цементного теста (рис. 3). При этом выявлена плотная зернистая структура с включениями небольшого количества пор размерностью 0,05–0,3 мм (рис. 3, а, б). Установлена блочно-агрегатная структура (рис. 3, в), образованная сросшимися чешуйчатыми поликристаллами гидросиликатов кальция

с формированием в отдельных местах друз кристаллов, гексагональными пластинчатыми кристаллами гидроалюминатов кальция. Отмечается обрастание зерен заполнителей кристаллической массой. В ходе геометрического отбора образована разноориентированная сросшаяся кристаллическая структура с формированием блоков-агрегатов. Частично наблюдаются формирования игольчатых кристаллов гидросульфалюминатов кальция, прорастающих в поровом пространстве и в соседние агрегатно-блочные образования.

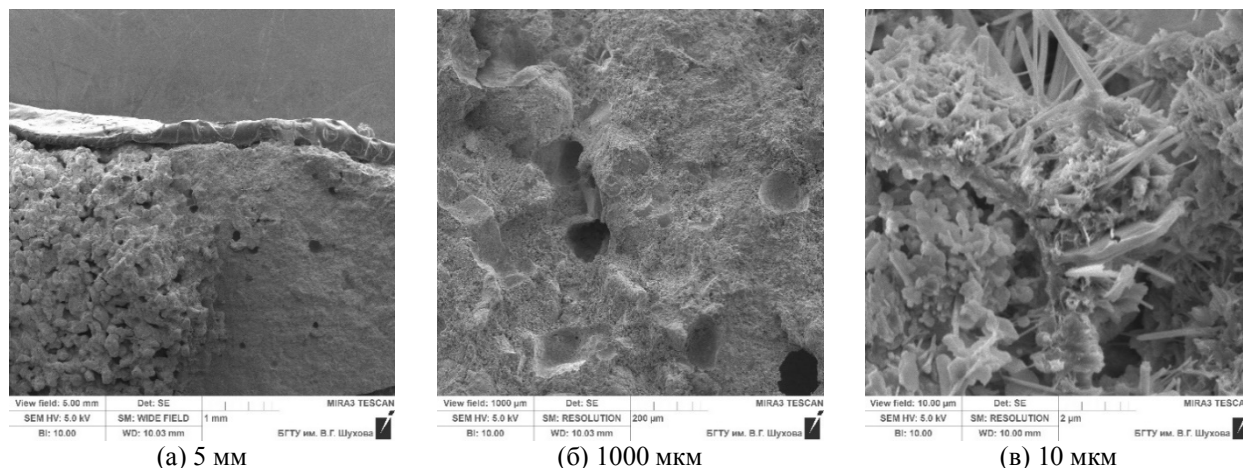


Рис. 1. Микроструктура контактного слоя гранулированных заполнителей 0,16+15 % ВК-3

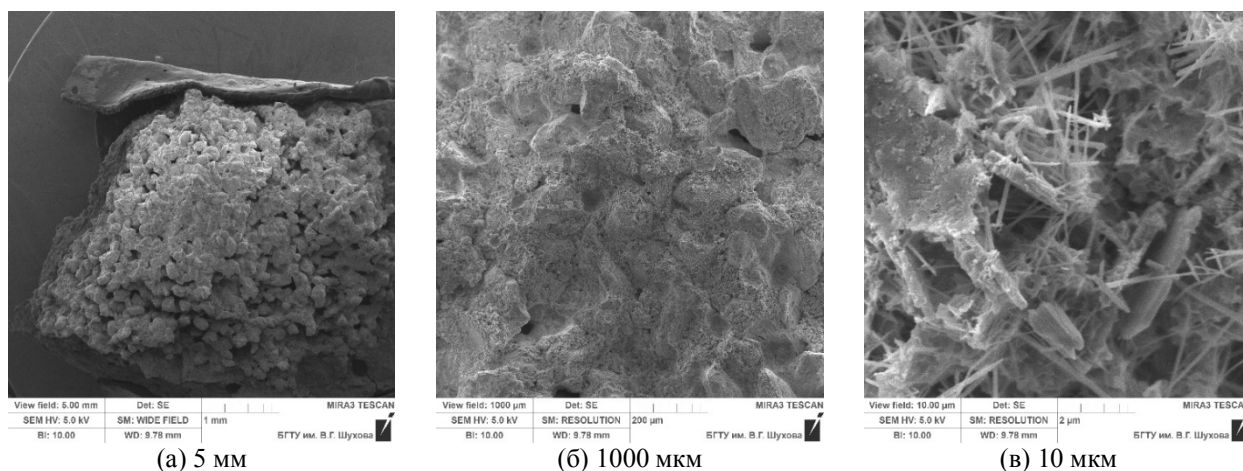


Рис. 2. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,16+15 % ВК-3

Изучая микроструктуру поверхности скола ГЗ с шифром 0,315+15 % ВК-3 (рис. 4), следует отметить, что наблюдается плотное зарастание кристаллических образований с наличием небольшого количества вкраплений пор размерами 0,01–0,15 мм. Наблюдается контактная область сцепления частицы заполнителя (кварцевого песка) и вяжущей композиции ВК-3 (рис. 4, б). Структура поверхности скола вяжущей композиции агрегатно- или блочно-ритмическая (рис. 4, в), с образованием разноориентированных чешуйчатых поликристаллов гидросиликатов кальция, игольчатых кристаллов гидросульфалюми-

натов кальция и дополнительных субмикроструктурных гидратных фаз в виде бахромы. На некоторых местах (рис. 4, в) отчетливо видны гексагональные пластинчатые кристаллы, по всей вероятности, низкосульфатного гидросульфалюмоферрита кальция [15–18]. Формирование кристаллической массы осуществляется методами наслоения с образованием кристаллоагрегатов в процессе гидратации минералов клинкера. Параллельная слоистость системы отсутствует. Наблюдается плотное сцепление кристаллической фазы с шероховатой поверхностью частиц заполнителя, что обеспечивает дополнительную прочность композита.

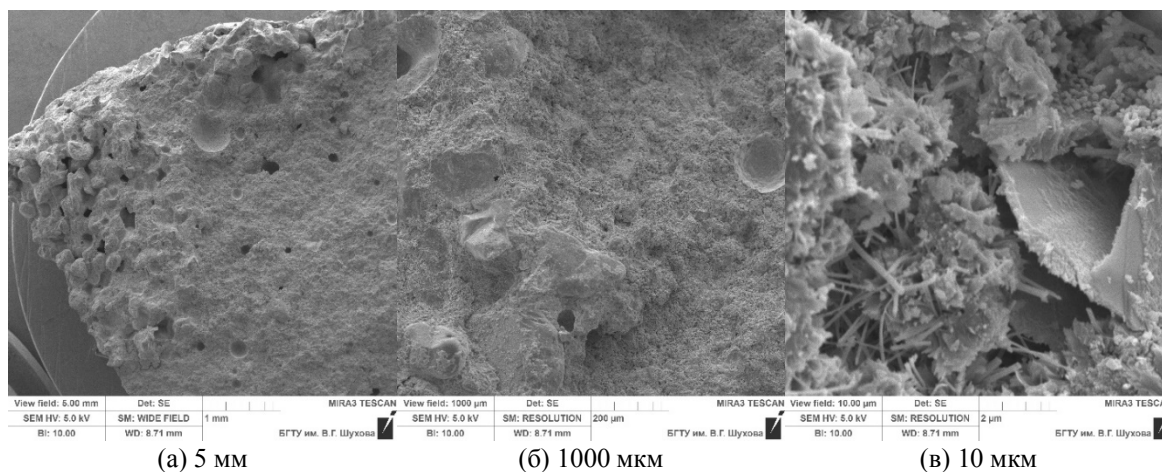


Рис. 3. Микроструктура контактного слоя гранулированных заполнителей 0,315+15 % ВК-3

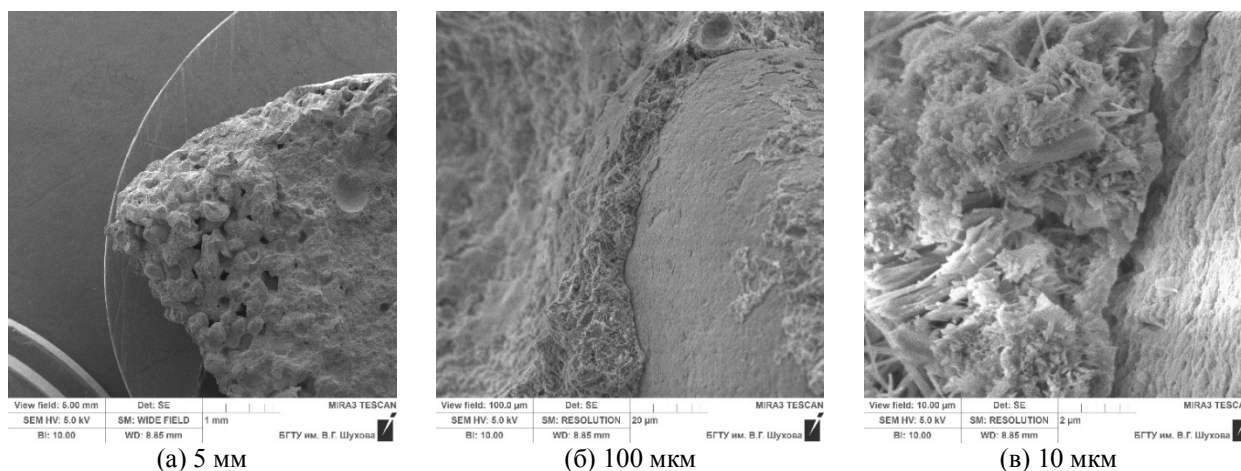


Рис. 4. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,315+15 % ВК-3

Поверхность контактного слоя ГЗ с шифром 0,63+15 % ВК-3 (рис. 5, а, б) характеризуется наличием зернистой мезоструктуры с наличием поровых пространств размерностью 0,01–0,5 мм. Шероховатая поверхность, угловатая форма частиц заполнителя, а также высокая пористость ГЗ увеличивают размерность контактного слоя, тем самым повышая интенсификацию и адгезию. Размеры контактного слоя находятся в пределах 1–1,3 мм. Микроструктура контактного слоя ГЗ шифра 0,63+15 % ВК-3 состоит из отдельных блоков-агрегатов (рис. 5, в), образованных разноориентированными чешуйчатыми поликристаллами гидросиликатов кальция, игольчатыми кристаллами этtringита, а также малыми призматическими кристаллами гидроксида кальция. Содержание 30 % дисперсного минерального наполнителя в составе композиционного вяжущего ВК-3 обеспечивает формирование плотной структуры вследствие зарастания пор и образование дополнительных субмикроструктурных центров гидратации. Кристаллические новообразования формируются послойно, что объясняется периодическим изменением концентраций раствора из-за разной скорости диффузии водного

раствора к исходным зернам вяжущего (портландцемента) через слой новообразований [16]. Слоистость контактного слоя отчетливо видна при значительном увеличении.

Микроструктурный анализ поверхностей скола ГЗ шифра 0,63+15 % ВК-3 (рис. 6) свидетельствует, что данный образец характеризуется значительным количеством пор размерами от 0,05 до 0,5 мм с одновременным плотным зарастанием межчастичного пространства и частиц заполнителя (кварцевого песка) кристаллами продуктов гидратации. Микроструктура ГЗ шифра 0,63+15 % ВК-3 состоит из отдельных блоков-агрегатов (рис. 6, в). Блочно-ритмическая структура имеет различную морфологию [13–16]. Одни блоки формируются из пластинчатых (чешуйчатых) поликристаллов гидросиликатов кальция, другие из гексагональных пластинчатых кристаллов гидроалюминатов кальция, третьи из удлиненных призматических кристаллов продуктов гидратации силикатов кальция. В результате геометрического отбора установлены образования параллельно направленных друз кристаллов. В общей массе структура блоков-агрегатов смешанная и разноориентированная, содержащая в себе суммарно все кристаллические

образования в разных пропорциях. Установлены малые образования игольчатых кристаллов этрингита, формирующиеся в поровых пространствах и микротрещинах цементного камня и ГЗ. С увеличением возраста твердения ГЗ предпола-

гается срастание и формирование новых кристаллоагрегатов сложной формы. Плотная структура зарастания межчастичного пространства определяет высокие физико-механические характеристики образцов на сжатие.

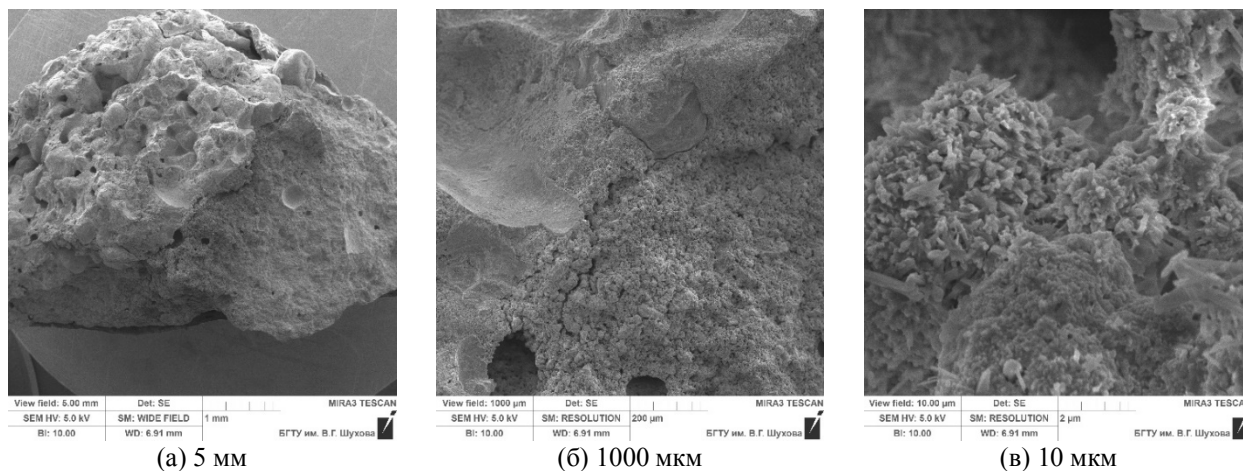


Рис. 5. Микроструктура контактного слоя гранулированных заполнителей 0,63+15 % KB-3

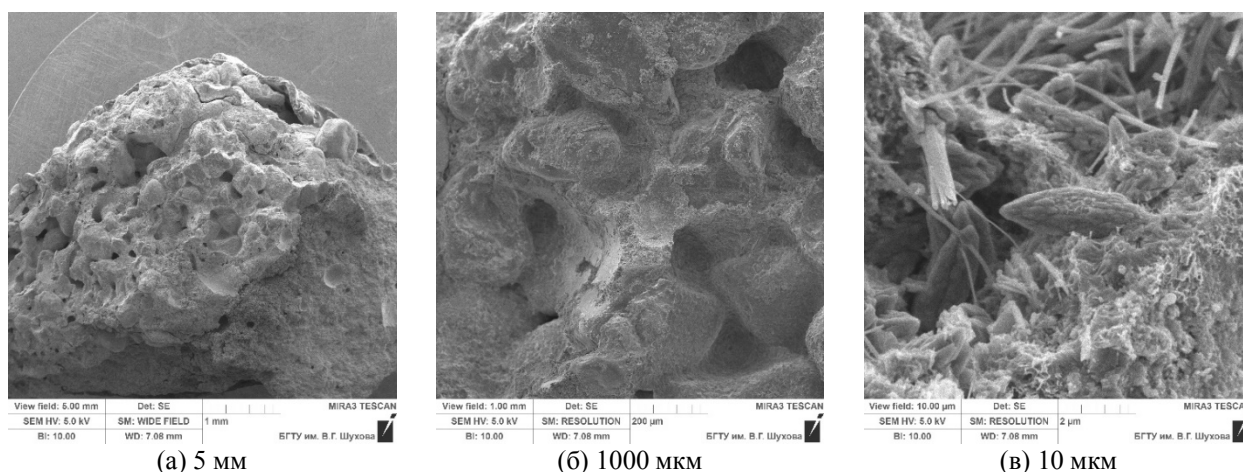


Рис. 6. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,63+15 % BK-3

Установлено, что вяжущая композиция BK-3 при гидратации образует плотную кристаллическую структуру с активным зарастанием пор и формированием дополнительных центров гидратации, за счет содержания в компонентном составе частиц кварцевого песка. Опираясь на результаты физико-механических испытаний, следует отметить, что наиболее перспективными образцами являются ГЗ с шифром 0,63+15 % BK-3, образующих плотную структуру системы и высокую степень адгезии с цементным тестом.

#### Выводы.

1. Установлено, что плотность кристаллических образований, отображающих микроструктуру образцов, напрямую влияет на физико-механические показатели композитов. Гранулированные заполнители на основе песков (фр. 0,16; 0,315; 0,63 мм) и вяжущей композиции BK-3 обладают высокой стабильной прочностью в диапазоне от 25,37 МПа до 26,98 МПа.

2. Микроструктура контактных слоев гранулированных заполнителей с цементным тестом представлена основными структурообразующими элементами: кристаллический сросток, не до конца гидратированные зерна портландцемента, тоберморитовый гель, поровое пространство, зерна наполнителя и зерна заполнителя.

3. По всему объему ГЗ пористое пространство плотно зарастает мелкодисперсными кристаллическими фазами, что прогнозирует получение образцов высокой прочности.

4. Сравнивая прочностные характеристики и микроструктуру ПЦ 500-Д0-Н и BK-1, следует отметить, что при применении BK-1 микроструктура образцов уплотняется. Таким образом, приготовление вяжущей композиции в вихревой струйной мельнице и использование минерального наполнителя в компонентном составе гранулированных заполнителей обеспечивают экономию дорогостоящего высокоэнергоемкого портландцемента при одновременном повышении

прочностных показателей. Экономия портланд-цемента осуществляется за счет его замены на кварцевый песок (ВК-1 – до 10 %; ВК-2 – до 20 %; ВК-3 – до 30 %), а также их совместного помола в ВСМ-01.

5. Анализ показателей прочности и микро-структуры гранулированных заполнителей с содержанием вяжущей композиции ВК-2 показал неравномерность формирования кристаллической структуры при гидратации, что негативно сказалось на величинах физико-механических показателей образцов. Данный состав ГЗ с вяжущей композицией ВК-2 нецелесообразно использовать при приготовлении растворов в связи с нестабильностью формирования внутренней структуры композита.

6. Отмечается, что при повышении добавления кварцевого песка в состав ВК от 10 до 30 % увеличиваются прочностные показатели ГЗ. В системе создается двойной каркас за счет совместной работы природного заполнителя, вяжущего и искусственно созданного наполнителя в составе ВК (кварцевого песка, добавляемого в количествах 10, 20, 30 %), что объясняется законом сродства структур.

7. На основании проведенных исследований по изучению формирования микроструктуры гранулированных заполнителей на разных вяжущих композициях наиболее перспективным является состав с шифром 0,63+15 % ВК-3 с прочностью при сжатии 26,98 МПа, характеризуемый стабильностью свойств и рекомендуемый для использования при приготовлении строительных растворов специального назначения.

**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. Palovčik 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. 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. P. 2994.

11. Zagorodnyuk L.H., Ryzhikh V.D., Makhortov D.S., Sumskey 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 Sub-standard 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 3)**

**Abstract.** *This article represents a logical continuation of the research results presented in the previous publication and reflects the results of studies of the effect of the binder composition No. 3 (BC-3) on the formation of the microstructure and physical and mechanical properties of granular aggregates. The experimental results demonstrate that the best indicators of the strength of granular aggregates are provided with the adding of BC-3 in an amount of 15 %, regardless of the fractional composition of quartz sand. In addition, the density of crystalline formations reflecting the microstructure of the samples directly affects the physical and mechanical properties of the composites. On dispersed micro fillers, as on a base plate, a dense micro-crystalline structure of new formations of hydrated calcium silicates is formed. The addition of 15% binder composition No. 3 (BC-3) to the component composition of granular aggregates ensures the stability of physical and mechanical properties. Thus, they can be recommended for use as coarse aggregates in the preparation of special-purpose mortar mixtures.*

**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. 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. P. 6655.

7. Zagorodnyuk L.H., Sumskey D.A., Chepenko A.S. Features of the processes of hydration of highly dispersed binders [Osobennosti processov gidratatsii 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. 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., Sumskey 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 3) // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 9. С. 20–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-20-27

#### 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 3). Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 9. Pp. 20–27. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-9-20-27