

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-28-36

**Загороднюк Л.Х., \*Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Синебок Д.А.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

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

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА РАЗНЫХ ВЯЖУЩИХ КОМПОЗИЦИЯХ

**Аннотация.** Настоящая работа включает исследование микроструктуры гранулированных заполнителей, приготовленных на разных вяжущих композициях. Представленная работа включает три части, посвященных анализу микроструктур гранулированных заполнителей с учетом изменения процентного содержания минерального наполнителя в вяжущих композициях. В статье рассмотрены основные аспекты формирования структуры гранулированных заполнителей при гидратации портландцемента (ПЦ 500-Д0-Н) и вяжущей композиции (ПЦ 500-Д0-Н + 10 % кварцевого песка), приготовленной в вихревой струйной мельнице. Выявлены основные закономерности влияния и дисперсности кварцевого минерального наполнителя (фракций  $\leq 0,16$ ;  $\leq 0,315$ ;  $\leq 0,63$  мм) на структурообразование при гидратации вяжущих компонентов, отличающихся различным составом и дисперсностью частиц. В работе проведен анализ физико-механических испытаний наиболее перспективных образцов с изучением особенностей их микроструктур. В исследовании микроструктур образцов выявлены общие закономерности прорастания кристаллических фаз разной плотности. Установлено, что введение 10% минерального тонкодисперсного наполнителя, в виде кварцевого песка, способствует формированию субмикроструктурных гидратных фаз, которые являются центрами гидратации, дополнительно связывающими отдельные зерна гранулированных заполнителей и уплотняющими структуру общей системы. Во всех образцах наблюдается формирование блочно-ритмической структуры, с присутствием отдельных блоков-агрегатов. Отмечается зарастание микроскопических пор мелкими кристаллическими новообразованиями гидросиликатов кальция. Выявлено, что структура гранулированных заполнителей, приготовленных на основе вяжущей композиции №1 (ВК-1) более плотная чем на портландцементе ПЦ 500-Д0-Н.

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

**Введение.** Современные направления научных исследований строительного материаловедения направлены на разработку экологически чистых материалов из некондиционного или отходного сырья различных отраслей промышленности. Безотходность производства – основная цель современной индустрии.

Сегодня одной из проблем производства строительных материалов является нехватка необходимых природных сырьевых материалов. Эффективное применение местного сырьевого строительного кластера и некондиционных материалов в строительном материаловедении позволяет повысить экономическую эффективность и улучшить экологическую обстановку территории.

В настоящее время имеется ряд научных разработок [1–6] по использованию производственных отходов в композиционных составах и подбора компонентов с целью повышения экологической безопасности и достижения оптимальных прочностных и технологических характеристик бетонов, ведутся разработки по созданию вяжущих композиций с улучшенным экономическим эффектом [7–9], увеличивающих рост энергетических ресурсов в строительном производстве.

Производство бетонов и растворов на разных территориях подразумевает использование крупных заполнителей. Остаются нерешенными вопросы нехватки крупных и мелких природных заполнителей требуемых кондиций на том или ином участке территории, вследствие чего строительство объектов становится экономически нецелесообразным [9, 10]. Поиск новых крупных и мелких заполнителей требует разработки дополнительных природных ресурсов, осуществление которых ведет к нарушению природно-экологического баланса. Создание искусственных крупных и мелких заполнителей требуемых фракций на базе некондиционного сырья, для воспроизводства на любой территории нашей страны и мира в целом, является актуальной задачей 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 ГЗ производилось на основе ПЦ 500-Д0-Н (ПЦ) и вяжущей композиции №1 (ВК-1). В свою очередь, ВК-1 получена путем совместного помола ПЦ=90 % и КП=10 % в вихревой струйной мельнице ВСМ-01 [11, 12].

Грануляция (экструзионное формование) КП производилась на автоматической шнековой установке Mystery MGM-3000 с мощностью 3000 Вт. В ходе исследования получены 6 видов гранулированных заполнителей (ГЗ) на основе ПЦ и ВК-1 и КП (фр.  $\leq 0,16$ ;  $\leq 0,315$ ;  $\leq 0,63$  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 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.** Исследования проводили с целью определения зависимостей изменения микроструктур при гидратации в системе: вид вяжущего – фракция песка – прочность образцов. В ходе проведения испытаний образцов на сжатие выявлены наиболее перспективные образцы (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 ПЦ 500-Д0-Н		
1.1	0,16+10 % ПЦ	18,9	22,12
1.2	0,315+10 % ПЦ	19,78	21,57
1.3	0,63+15 % ПЦ	19,49	22,80
2	Гранулированные заполнители с ВК-1		
2.1	0,16+10 % ВК-1	19,47	20,88
2.2	0,315+10 % ВК-1	25,08	26,52
2.3	0,63+15 % ВК-1	25,23	26,32

Многогранность и сложность процессов гидратации при затвердевании компонентных растворов с ГЗ затрудняет объяснение поведения образцов в процессе испытаний при сжатии на гидравлическом прессе ПГМ-50МГ4. С целью изучения микроструктуры образцов выполнены микрофотографии сколов структуры ГЗ на микроскопе высокого разрешения Tescan Mira 3 LMU.

Микрофотографии поверхностей сколов ГЗ с шифром 016+10 % ПЦ (рис. 1) свидетельствуют о плотном зарастании кристаллической массой. Поверхность скола ГЗ имеет блочно-ритмическую структуру. Кристаллы гидро-силикатов кальция, гидросульфоалюминатов кальция и гидроалюминатов кальция составляют основную массу беспорядочно ориентированных чешуйчатых поликристаллов [13]. На поверхности частиц заполнителя ГЗ наблюдается активное обрастание малыми игольчато-чешуйчатыми кристаллами. Срастание кристаллических чешуек образует местами плотную микроструктуру структуры ГЗ. Отчетливо просматривается четыре вида ориентации кристаллообразований (рис. 1, в): первый – параллельно ориентированные игольчатые кристаллы гидросиликатов кальция; второй – сросшиеся и параллельно направленные

кристаллы гидроалюминатов и гидросульфоалюминатов кальция; третий – шестигранные призмы этtringита или оксида кальция; четвертый – блоки из пакетов волокон гидросиликатов кальция. Свободное поровое пространство между частицами кварцевого песка в ГЗ создает благоприятные условия для развития мелкодисперсной кристаллической структуры.

Очевидно, что при высокой удельной поверхности кварцевых песков ( $\leq 0,16$  мм) с малым добавлением портландцемента в ГЗ, зарастание поликристаллической структурой межчастичного пространства будет невысоким. Однако, при взаимодействии в компонентном составе смеси, ГЗ показывают себя как эффективный заполнитель.

Микроструктура поверхности скола ГЗ шифра 0,315+10 % ПЦ (рис. 2) свидетельствует о формировании блочно-ритмической структуры [14]. При увеличении 5 мм и 1000 мкм (рис. 2, а, б) наблюдается зернистая структура ГЗ, с наличием большого объема пор размерами от 0,3 до 0,5 мм. Снимок при увеличении 10 мкм (рис. 2, в) констатирует о достаточном росте поликристаллов чешуйчатой формы, ориентированных в разных направлениях. Структурные единицы кри-

сталлических образований формируются в отдельные блоки-агрегаты. Замечено зарастание

микроскопических пор мелкокристаллическими новообразования гидросиликатов кальция.

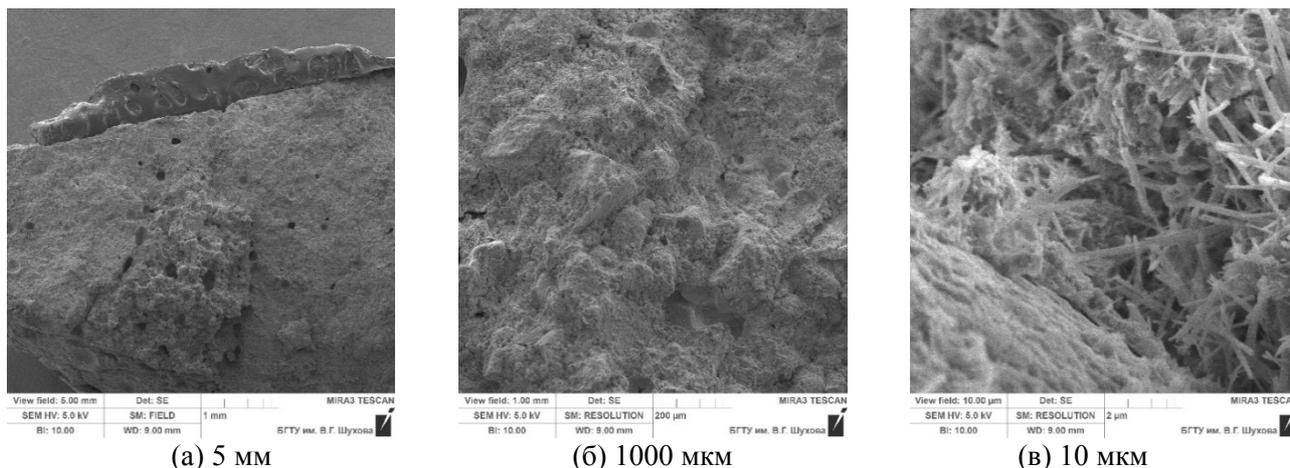


Рис. 1. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,16+10 % ПЦ

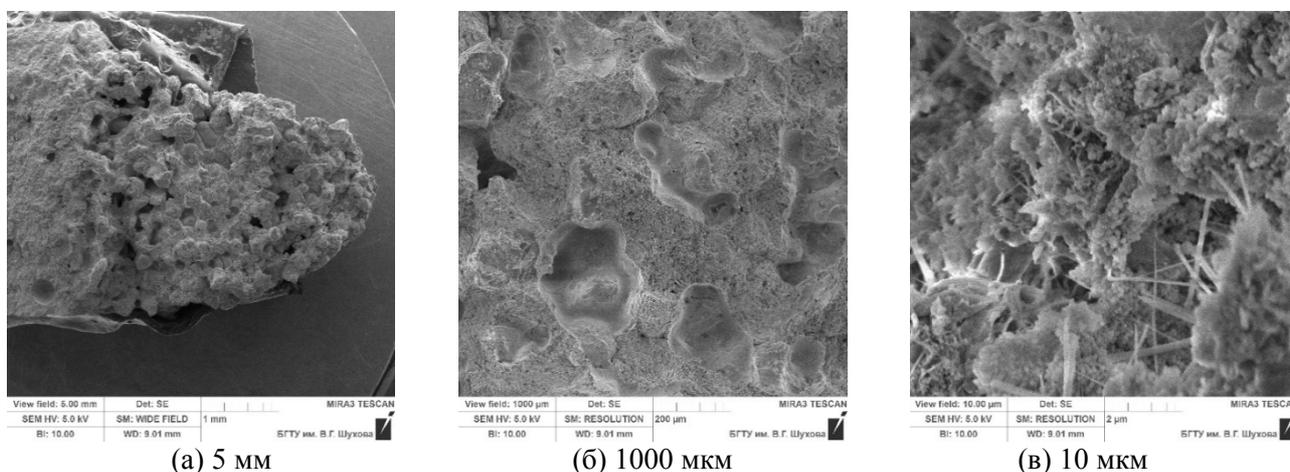


Рис. 2. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,315+10 % ПЦ

Микроструктура поверхности скола в области ГЗ шифра 0,63+15 % ПЦ (рис. 3) формируется из отдельных зерен кварцевого песка (фракцией зерен  $\leq 0,63$  мм), обросших кристаллическими образованиями. Структура скола ГЗ – агрегатно-или блочно-ритмическая с образованием отдельных блоков-агрегатов из чешуйчатых поликристаллов [14, 15]. Необходимо отметить, что при формировании ГЗ (0,63+15 % ПЦ) комплектуется высокопористая структура с размерами пор от 0,3 до 0,6 мм (рис. 3, а, б). Стенки таких воздушных пор покрываются сплошной плотной пленкой новообразований, фильтрация воды через которую так же затруднена, как через основную плотную массу цементного камня. Наблюдается плотное зарастание кристаллоагрегатами (чешуйчатыми и призматическими поликристаллами) отдельных областей пор и первоначальных центров гидратации (рис. 3, в). Отчетливо видно, что в ходе гидратации на частицах кварцевого песка формируются параллельно ориентированные слои пла-

стинчато-чешуйчатых поликристаллов образованные из гидросиликатов кальция и алюминий содержащих минералов.

На рис. 4 приведены снимки микроструктуры сколов образцов в местах закладки ГЗ (0,16+10 % ВК-1). Структура ГЗ характеризуется, как агрегатно-ритмическая с формированием кристаллоагрегатов и кристаллических сростков [14, 16, 17]. Мезоструктура сколов (рис. 4, а, б) – мелкопористая с размерами пор от 0,01 до 0,1 мм и плотным обрастанием частиц кварцевого песка чешуйчатыми поликристаллами. Межчастичное пространство в ГЗ заполнено кристаллическими образованиями этtringита, гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. Содержание этtringитовой фазы ослабляет структурную прочность ГЗ. Однако, плотное прорастание игольчато-призматических кристаллов увеличивает физико-механические показатели системы при сжатии. В частности, обнаружены мелкодисперсные частицы наполнителя (кварцевого песка), введен-

ные в компонентный состав в процессе получения вяжущей композиции. Частицы наполнителя в компонентном составе вяжущего являются подложками для создания гидратационных центров, обрастающих плоскими чешуйчатыми поликристаллами. Ввод наполнителей в компонентный

состав вяжущих увеличивает содержание субмикроструктурных гидратных фаз, которые дополнительно связывают частицы кварцевого песка (заполнителя) и уплотняют структуру ГЗ.

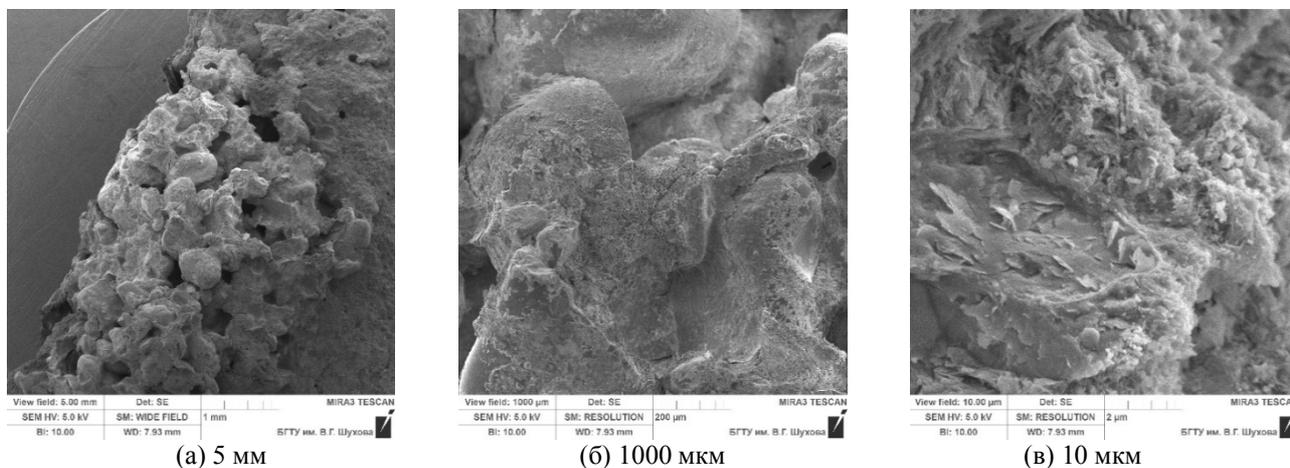


Рис. 3. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,63+15 % ПЦ

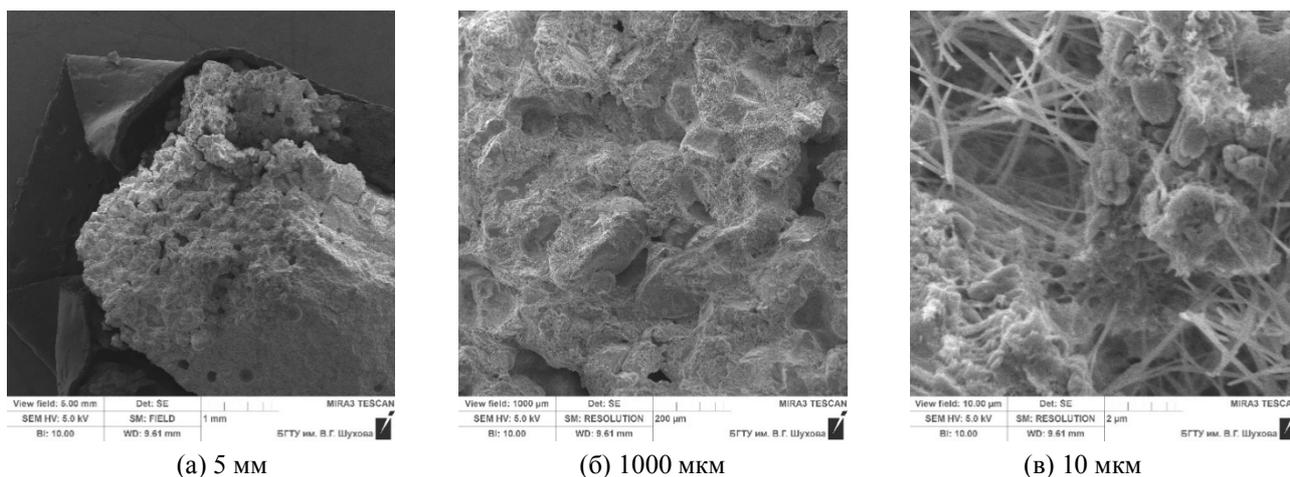


Рис. 4. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,16+10 % ВК-1

Микроструктура среза гранулированных заполнителей образца с шифром 0,315+10 % ВК-1 (рис. 5) образована из отдельных частиц заполнителя, связанных композиционным вяжущим ВК-1. ГЗ на основе ВК-1 имеет большое количество пор, размерами от 100 до 500 мкм. Структура формирования кристаллических образований характеризуется, как блочно-ритмическая с ориентацией чешуйчатых поликристаллов в разных направлениях [13]. По нашему мнению, наличие 10 % наполнителя в композиционном составе вяжущего увеличивает содержание субмикроструктурных гидратных фаз, которые могут являться центрами гидратации, дополнительно связывать отдельные зерна гранулированных заполнителей и уплотнять структуру общей системы. Четко просматривается несколько

видов формирования кристаллов (рис. 5, в): пластинчатых (чешуйчатых), образовавшихся при гидратации двухкальцевого (C2S) и трехкальцевого (C3S) силикатов; беспорядочно ориентированных игольчатых кристаллов гидросульфаталюминатов кальция ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) и гидросиликатов кальция; гексагональных пластинчатых кристаллов, формирующихся при гидратации четырехкальцевого алюмоферрита (C4AF). Наблюдается зарастание поровых объемов игольчатыми кристаллическими новообразованиями. Структура ГЗ с шифром 0,315+10 % ВК-1 отличается достаточно плотной компоновкой зерен заполнителя и блоков-агрегатов кристаллической фазы.

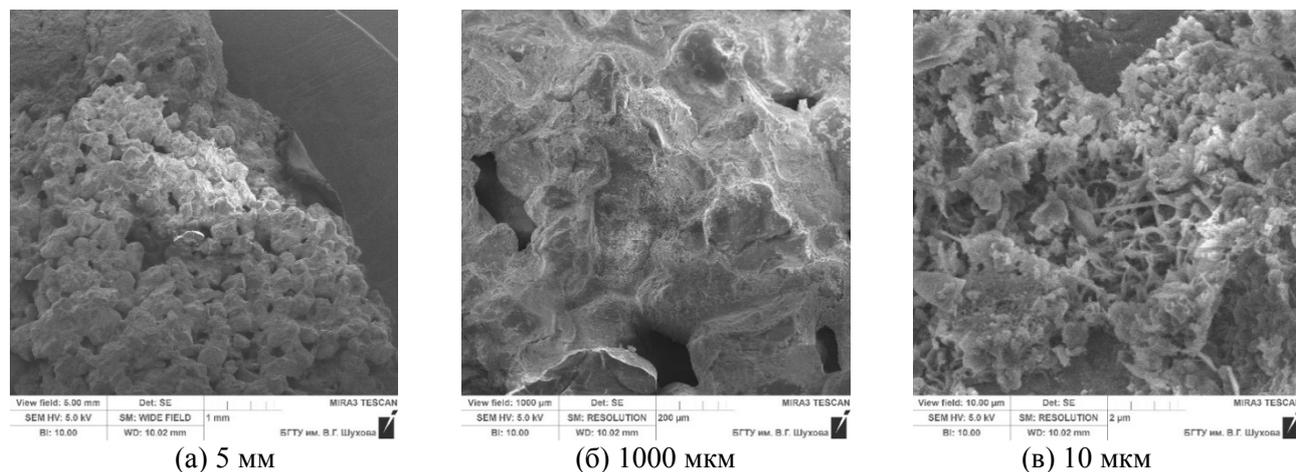


Рис. 5. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,315+10 % ВК-1

На рис. 6 приведены микрофотографии поверхности скола ГЗ с шифром 0,63+15 % ВК-1. Микроскопические снимки свидетельствуют о наличии пористой структуры ГЗ с размерами пор от 0,05 до 0,7 мм. Структура поверхности скола ГЗ (рис. 6, в) агрегатно- или блочно-ритмическая с разно-ориентированными блоками параллельных чешуйчатых поликристаллов. Ориентация слоев ограничивается размерами блока. Параллельная слоистость на одних участках выявляется очень четко, на других менее четко, на третьих не выявляется. В одних блоках слои состоят

из параллельно ориентированных сросшихся пластинчатых кристаллов гидроалюмоферритов и моносульфоалюминатов кальция, в других из параллельно сросшихся шестигранных призм, в-третьих из пакетов волокон и иголок гидросиликатов кальция. Концентрическое расположение разноориентированных слоев кристаллов наглядно показывает ритмичность микроструктуры [18], обусловленной высокой удельной поверхностью вяжущей композиции, полученной в вихревой струйной мельнице.

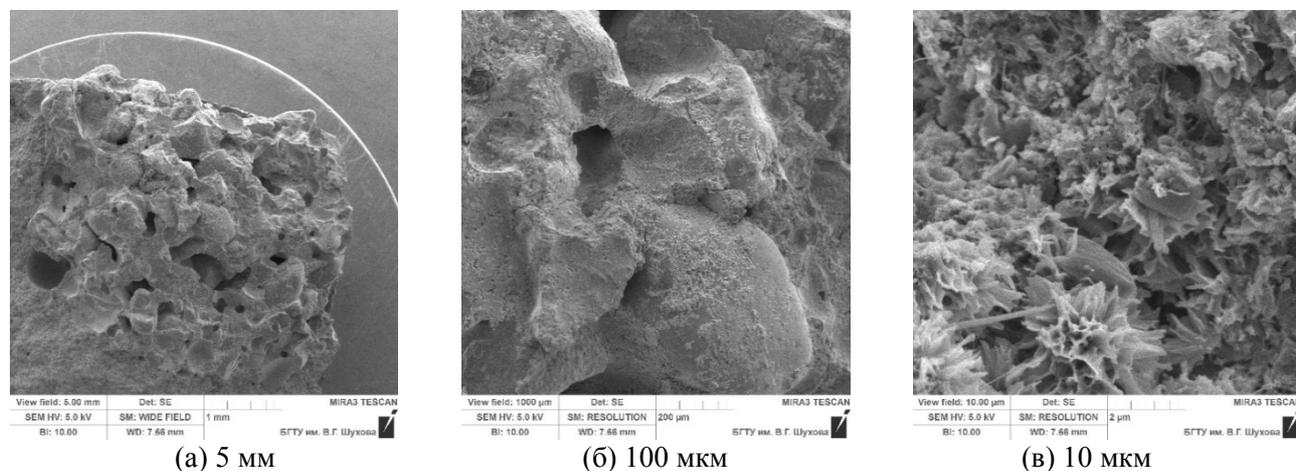


Рис. 6. Микроструктура поверхности скола гранулированных заполнителей 0,63+15 % ВК-1

Известно, что на процесс кристаллизации влияют даже малые дозы примесей, поэтому с высокой точностью нельзя утверждать о каком-либо структурообразовании (кристаллизации) системы с портландцементом. Микроструктурный анализ определил некоторые закономерности и показал значительные изменения в формировании кристаллических фаз с использованием разных ГЗ. Изучение микроструктуры наглядно подтвердило полученные результаты физико-механических исследований.

### Выводы

1. Процесс структурообразования в различных видах ГЗ имеет свои особенности, которые обусловлены применением кварцевого песка той или иной дисперсности, видом вяжущего компонента, его процентным содержанием, водовязущим отношением.

2. Проведенные исследования позволили установить влияние изменения дисперсности применяемых вяжущих композиций (ВК-1) в сравнении с товарным портландцементом (ПЦ 500-Д0-Н) на физико-механические показатели

образцов, эти изменения аналогичным образом отражаются на формировании микроструктуры ГЗ, при применении ВК-1 кристаллическая структура более густая и однородная.

3. Установлено, что высокие физико-механические показатели образцов подтверждаются высокой степенью зарастания микроструктуры кристаллами гидросиликатов и гидроалюминатов кальция на мелкодисперсных зернах минерального наполнителя. Прочность ГЗ на основе ПЦ находится в диапазоне от 18,9 до 19,78 МПа, а прочностные показатели ГЗ на основе ВК-1 распределяются в пределах от 19,47 до 25,23 МПа, что позволяет рекомендовать их в качестве заполнителей для строительных растворов.

**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. 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., 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, № 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. Адрес: 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. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Сумской Дмитрий Алексеевич**, ассистент кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: pr9nik2011@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Адрес: 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. Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 09.04.2021 г.

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

**Zagorodnyuk L.Kh., \*Ryzhikh V.D., Sumskey D.A., Sinebok D.A.**  
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
Russia, 308012, Belgorod, Kostukova st., 46  
\*E-mail: ryzhikh.vlad@mail.ru

## FEATURES OF THE FORMATION OF THE MICROSTRUCTURE OF GRANULAR AGGREGATES ON DIFFERENT BINDING COMPOSITIONS

**Abstract.** This work includes a study of the microstructure of granular aggregates prepared on various binding compositions. The presented work includes three parts devoted to the analysis of the microstructures of granular aggregates taking into account the change in the percentage of the mineral filler in binding compositions. The article deals with the main aspects of the formation of the structure of granular aggregates during the hydration of Portland cement (PC 500-D0-N) and a binder composition (PC 500-D0-N + 10 % quartz sand) prepared in a vortex jet mill. The main regularities of the influence and dispersion of quartz mineral filler (fractions  $\leq 0.16$ ;  $\leq 0.315$ ;  $\leq 0.63$  mm) on structure formation during the hydration of binding components differing in the composition and particle dispersion are revealed. The paper analyzes physical and mechanical tests of the most promising samples with a study of their microstructure features. The study of the sample microstructures reveals the general regularities of the growth of crystalline phases of different densities. It is established that the introduction of 1 0% mineral fine-dispersed filler, in the form of quartz sand, contributes to the formation of sub-microcrystalline hydrate phases, which are centers of hydration, additionally binding individual grains of granular aggregates and compacting the structure of the overall system. In all samples, the formation of a block-rhythmic structure is observed, with the presence of individual block-aggregates. There is an overgrowth of microscopic pores with small crystalline neoplasms of calcium hydrosilicates. It is revealed that the structure of granular aggregates prepared on the basis of binder composition No. 1 (BK-1) has higher density than on Portland cement PC 500-D0-N.

**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, No. 19. 6655.
7. Zagorodnyuk L.H., Sumskey 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. 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.

**Sumskey, Dmitry A.** Assistant. E-mail: pr9nik2011@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 09.04.2021*

#### **Для цитирования:**

Загороднюк Л.Х., Рыжих В.Д., Сумской Д.А., Синебок Д.А. Особенности формирования микроструктуры гранулированных заполнителей на разных вяжущих композициях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 5. С. 28–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-28-35

#### **For citation:**

Zagorodnyuk L.Kh., Ryzhikh V.D., Sumskey D.A., Sinebok D.A. Features of the formation of the microstructure of granular aggregates on different binding compositions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2021. No. 5. Pp. 28–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-5-28-35