

DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-17-23

Толыпин Д.А., *Толыпина Н.М.*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова***E-mail: tolypina.n@yandex.ru*

ВЛИЯНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОГО БЕТОННОГО ЛОМА 3D-ПЕЧАТИ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ БЕТОНА

Аннотация. В статье рассмотрено влияние полидисперсного бетонного лома 3D-печати на структурообразование бетона при его повторном применении. Установлено, что благоприятное влияние на прочность обусловлено наличием на поверхности вторичного мелкого заполнителя тонких слоев в виде гидратных фаз, усиливающих адгезию к формирующейся цементной матрице. При этом немаловажную многофункциональную роль играет тонкодисперсная фракция, состоящая из цементной матрицы с незначительным количеством пылевидного клинкера и кварца: увеличивает объем вяжущей части; выполняет функцию центров кристаллизации гидратных фаз; способствует формированию компактной и однородной структуры за счет заполнения пор; повышает прочность за счет гидратации минералов алита и белита.

Показано, что минимизация пустотности тонкодисперсной части бетонного лома во многом обусловлена полимодальным зерновым составом, что способствует оптимизации структуры мелкозернистого бетона и повышению прочности.

Установлены особенности микроструктуры образцов мелкозернистого бетона. Искусственный конгломерат на основе бетонного лома характеризуется компактной структурой благодаря высокой адгезии мелкого заполнителя к цементной матрице бетона, заполнению пор гидратными фазами и тонкодисперсными частицами в отличие от образцов мелкозернистого бетона контрольного состава, структура которых характеризуется слабой контактной зоной между заполнителем и цементной матрицей и пористой структурой.

Ключевые слова: бетонный лом, структура, гранулометрия, наполнитель, мелкозернистый бетон.

Введение. Бетонный лом изделий и конструкций 3D-аддитивного производства представляет собой мелкозернистый бетон, твердевший в воздушных условиях, что обуславливает наличие в цементной матрице значительного количества негидратированных клинкерных частиц, способных после измельчения гидратироваться с образованием новой структуры твердения. После кратковременного помола в вибрационной мельнице бетонный лом содержит частично очищенный и измельченный кварцевый песок, тонкодисперсную цементную матрицу с примесью пылевидного кварца и клинкера [1–2]. Полифракционный гранулометрический состав многокомпонентной смеси способствует образованию полидисперсной структуры, в которой более мелкие частицы располагаются в пустотах крупных частиц, при этом обеспечивается минимизация пустотности пылевидной фракции, что положительно влияет на прочность образцов мелкозернистого бетона [3–7]. На практике пористая структура бетона устраняется увеличением расхода цемента либо вводом тонкодисперсных наполнителей, что обеспечивает заполнение пор новообразованиями или тонкодисперсными частицами наполнителя [8–11]. Однако выполнение данных требований приводит к удорожанию бетонов, так как стоимость дисперсных наполни-

телей может в несколько раз превышать стоимость вяжущего, поэтому поиск дешевых наполнителей является актуальной задачей [12–20]. При повторном использовании бетонного лома эта проблема решается за счет того, что при кратковременном помоле образуется тонкодисперсный наполнитель, количество которого достигает 28–30 %, состоящий в основном из измельченного цементного камня и небольшой доли кварцевой муки и клинкерных частиц, что увеличивает объем тонкодисперсной части и тем самым обеспечивает надежное формирование плотной цементной матрицы вокруг всех частиц заполнителя. В системе, состоящей из крупных и мелких частиц, при разрыве поверхности происходит взаимодействие фронта растущей трещины с преградами в виде наполнителей оптимальной крупности, что также благоприятно влияет на прочностные характеристики искусственного конгломерата.

Исследованию особенностей формирования микроструктуры мелкозернистого бетона на основе бетонного лома 3D-печати посвящается данная работа.

Методы и материалы. Мелкозернистый бетон (Ц:П=1:4) на основе кварцевого песка фракции 0,16–1,25 мм заформовывали в лабораторных условиях по методу 3D-печати. После твердения

в воздушно-сухих условиях 10-12 мес и дробления на лабораторной щековой дробилке измельчали в лабораторной вибрационной мельнице. Тонкая фракция <0,16 мм отделялась путем просеивания смеси через стандартное сито 016 для определения зернового состава песка. Различная удельная поверхность тонкой фракции бетонного лома ($S_{уд <0,16}=420 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $S_{уд <0,16}=510 \text{ м}^2/\text{кг}$) получена в результате различной продолжительности помола бетонного лома в вибрационной мельнице (10 и 20 мин). Кинетику твердения мелкозернистого бетона исследуемого и контрольного состава изучали на образцах $3 \times 3 \times 3 \text{ см}$, в качестве вяжущего использовали ЦЕМ I 42,5 Н. Фазовый состав определяли при помощи рентгеноструктурного анализа. Для исследования микрострук-

туры образцов мелкозернистого бетона использовали растровый электронный микроскоп «TESCAN MIRA 3 LMU» Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Основная часть. Путем кратковременного помола бетонного лома 3D-печати в вибрационной лабораторной мельнице получали смесь, состоящую из частично очищенного кварцевого песка, тонкодисперсной цементной матрицы и клинкерной части, благодаря значительной разнице в размолоспособности составляющих компонентов. В качестве критерия степени измельчения использовали удельную поверхность фракции менее 0,16 мм, содержащей преимущественно тонкодисперсный цементный камень с небольшим количеством кварцевой пыли и клинкерных минералов (алита и белита) (рис. 1).

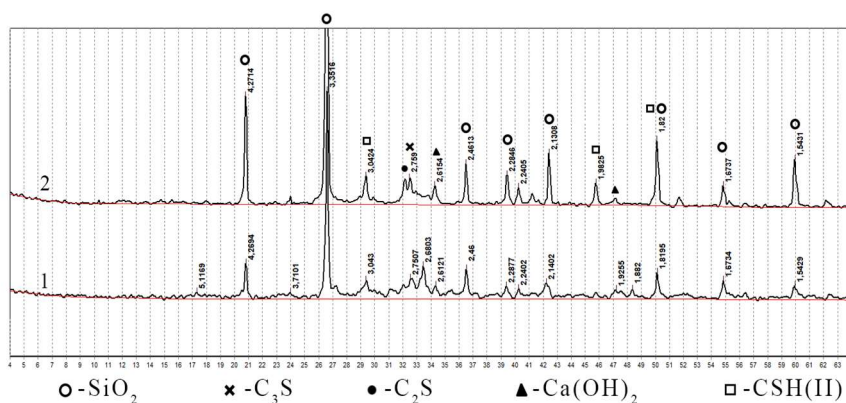


Рис. 1. Рентгенограмма пылевидной фракции бетонного лома: 1– $S_{уд <0,16}=420 \text{ м}^2/\text{кг}$; 2– $S_{уд <0,16}=510 \text{ м}^2/\text{кг}$

К факторам, способствующим более интенсивному формированию ранней и нормированной прочности бетона на бетонном ломе (табл. 1) по сравнению с контрольным составом, следует отнести: повышение адгезии формирующейся цементной матрицы ко вторичному мелкому заполнителю из-за наличия на его поверхности

тонких слоев в виде гидратных фаз и полифункциональное действие частиц тонкодисперсной части, заключающееся в увеличении объема вяжущего компонента, создании дополнительных центров кристаллизации, снижения пористости, гидратации алита и белита.

Таблица 1

Кинетика набора прочности при сжатии образцов мелкозернистого бетона

№	Бетонный лом, %	ЦЕМ I 42,5 Н, %	Кв. песок, %	В/Ц	В/Т	Предел прочности при сжатии, МПа			
						2 сут	7 сут	14 сут	28 сут
Контрольный состав 1:4									
1	0	80	20	0,58	0,12	6,03	11,39	15,71	17,10
Бетонный лом ($S_{уд.общ}=135 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{уд <0,16}=420 \text{ м}^2/\text{кг}$)									
2	100	0	0	-	0,15	1,98	6,36	7,14	8,17
3	90	10	0	1,35	0,14	11,71	22,68	24,46	25,52
4	80	20	0	0,69	0,13	12,35	28,57	30,57	35,23
Бетонный лом ($S_{уд.общ}=150 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{уд <0,16}=510 \text{ м}^2/\text{кг}$)									
5	100	0	0	-	0,16	2,11	6,57	7,62	8,67
6	90	10	0	1,43	0,14	13,58	24,59	26,31	28,60
7	80	20	0	0,71	0,14	15,68	29,84	33,10	36,28

Тонкодисперсные частицы цементного камня являются более предпочтительными подложками для синтеза зародышей гидратных фаз,

чем частицы исходного вяжущего, так как эпитаксиальные контакты наиболее энергично достраиваются к близкой по химической природе

кристаллической решетке гидратных фаз наполнителя из цементного камня, при этом значительно снижается энергия образования центров кристаллизации в соответствии с положением Гиббса–Фольмера. Однако, высокодисперсные частицы цементной матрицы являются не только эффективными центрами для образования центров кристаллизации, но и одновременно осуществляют заполнение пор, что способствует обеспечению компактности и однородности структуры для получения низкой пористости и высокой плотности бетона. В таких случаях важную роль играет сочетание оптимальной гранулометрии наполнителей.

Гранулометрия тонкодисперсной части бетонного лома характеризуется полимодальным распределением частиц с тремя, четко выраженными экстремумами на графике дифференциального распределения частиц: в интервале 2–3 мкм (9,3 %), 10–20 мкм (21,1 %) и 60–80 мкм (8,6 %) (рис. 2). Это обусловлено неоднородностью состава тонкодисперсной части и различной размо- лоспособностью компонентов, в соответствии с которой их можно расположить в ряд по убыванию: кварц – клинкер – цементный камень. При этом гранулометрическая кривая портландце- мента характеризуется одномодальным распре- делением частиц, с максимальным содержанием частиц в диапазоне 15–30 мкм.

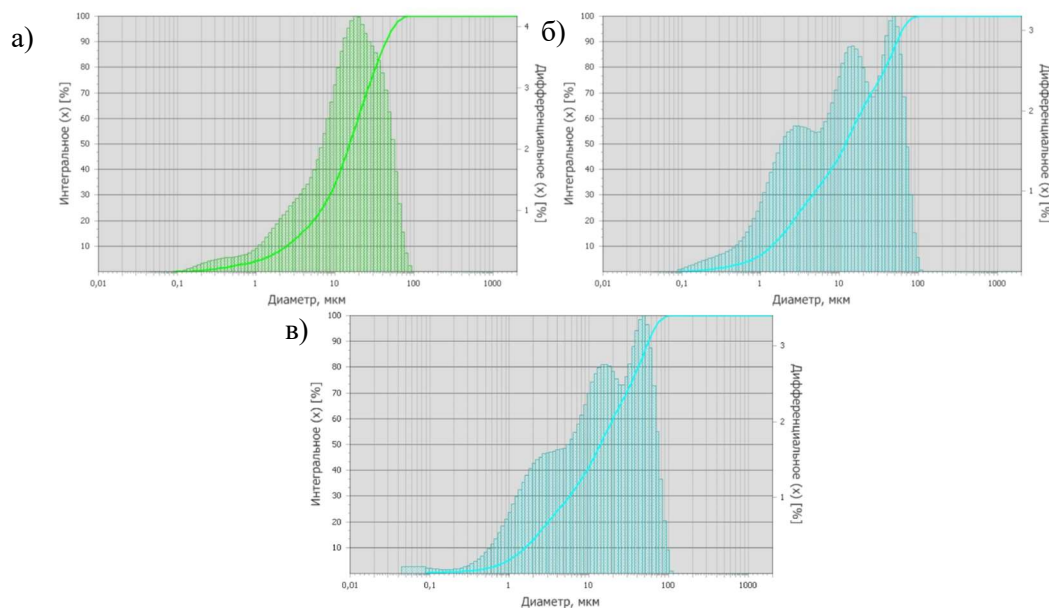


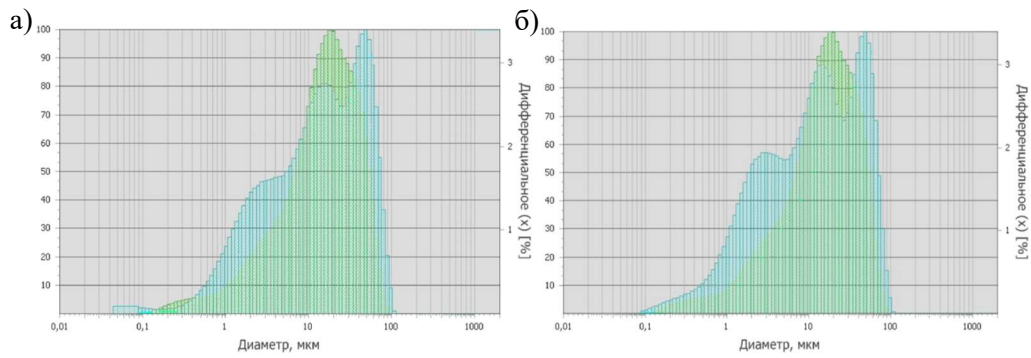
Рис. 2. Гранулометрия вяжущего ЦЕМ I 42,5 Н и тонкодисперсной фракции бетонного лома: а) ЦЕМ I 42,5 Н; б) фракция $<0,16\text{ мм}$ ($S_{уд}=510\text{ м}^2/\text{кг}$); в) фракция $<0,16\text{ мм}$ ($S_{уд}=420\text{ м}^2/\text{кг}$)

Анализ гранулометрических кривых, характеризующих содержание и соотношение различных фракций, показывает, что гранулометрия тонкодисперсной фракции бетонного лома выходит за пределы зернового состава частиц бетонного лома как в диапазон меньшего, так и большего размера частиц. В смешанном вяжущем (ЦЕМ I 42,5 Н + фракция $<0,16\text{ мм}$) за счет наличия тонкодисперсного порошка увеличивается количество мелких фракций (рис. 3): 0,1–1 мкм на 5,2 %, 1–10 мкм на 9,6 %. Увеличение количества частиц больших размеров 60...100 мкм на 7,8 % при избытке пылевидной фракции с высокой дисперсностью благоприятно влияет на снятие деструктивных напряжений, основанных на электростатическом взаимодействии и механическом заземлении, вызывающих образование трещин и нарушения микрооднородности структуры.

Анализ микроструктуры образцов, приведенных на рис. 4, подтверждает преимущества мелкозернистого бетона на бетонном ломе перед

бетоном контрольного состава. Повышенные прочностные свойства образцов мелкозернистого бетона на бетонном ломе (с мелким наполнителем и тонкодисперсным наполнителем) обусловлены мелкозернистой структурой искусственного конгломерата, заполнение пор в цементной матрице происходит не только растущими гидратными новообразованиями, но и тонкодисперсными частицами наполнителя, что способствует повышению плотности.

На поверхности контакта между кварцевым песком бетонного лома со сросшейся пленкой гидросиликатов кальция и новой формирующейся цементной матрицей мелкозернистого бетона не наблюдается раздела между структурными элементами, что свидетельствует об их высокой адгезии (рис.4, б), в отличие от мелкозернистого бетона контрольного состава, где граница контакта между поверхностью кварцевого песка и матрицей четко прослеживается (рис. 4, а).



■ – тонкодисперсный бетонный лом; ■ – ЦЕМ I 42,5 Н; ■ – ЦЕМ I 42,5 Н + бетонный лом

Рис. 3. Гранулометрия вяжущего ЦЕМ I 42,5 Н с тонкодисперсным наполнителем

из бетонного лома: а) ЦЕМ I 42,5 Н + фракция <0,16 мм ($S_{уд}=420 \text{ м}^2/\text{кг}$);

б) ЦЕМ I 42,5 Н + фракция <0,16 мм ($S_{уд}=510 \text{ м}^2/\text{кг}$)

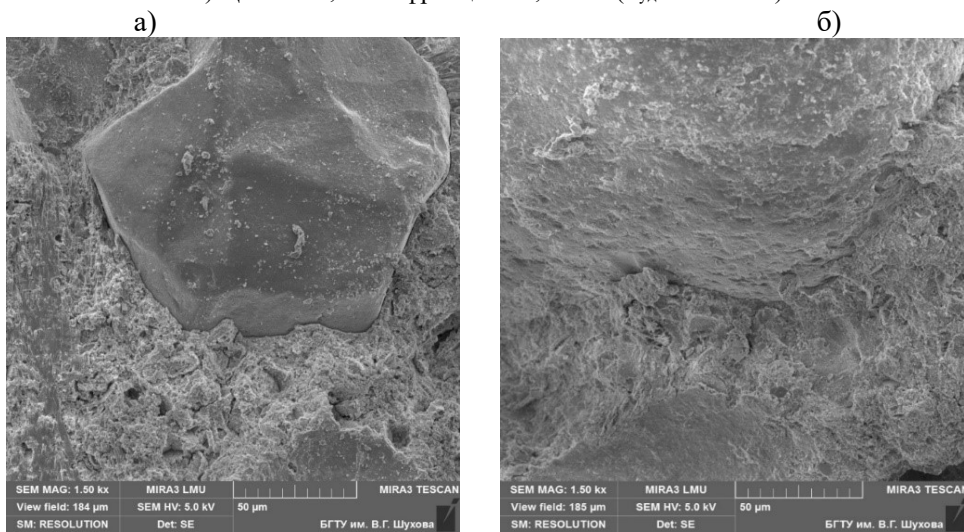


Рис. 4. Микроструктура образцов мелкозернистого бетона:

а) контрольный состав (ПЦ-20 %, кв. песок-80 %); б) ПЦ-20 %, бет. лом.-80 %

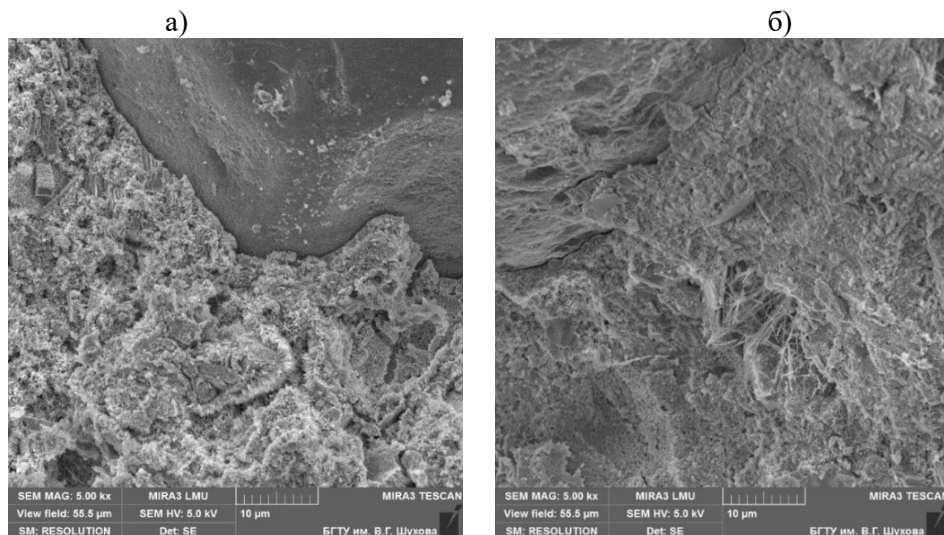


Рис. 5. Микроструктура образцов мелкозернистого бетона:

а) контрольный состав (ПЦ-20 %, кв. песок-80 %); б) ПЦ-20 %, бет. лом.-80 %

Микрофотографии поверхности мелкозернистого бетона на бетонном ломе при большем увеличении показывают (см. рис. 5, б), что

наблюдается омоноличивание цементной матрицы с густым зарастанием пор гидратными новообразованиями.

Структура затвердевшего конгломерата представлена плотным массивом (рис. 5, б), покрытым субмикроскопическими новообразованиями. Формируются частицы новообразований нано- и микроуровня, структура гидросиликатного геля равномерная по объему образцов мелкозернистого бетона, что свидетельствует об активном процессе гидратации вяжущего. Частички измельченного бетонного лома покрыты плотными слоями гидросиликатов кальция. При этом происходит обжиг частиц наполнителя и заполнителя многокомпонентной матрицы, что обуславливает высокие прочностные свойства искусственного конгломерата.

Выводы. Установлено, что повышенная прочность мелкозернистого бетона на бетонном ломе 3D-печати обусловлена повышенной адгезией формирующейся цементной матрицы ко вторичному мелкому заполнителю и влиянием тонкодисперсного компонента на увеличение объема вяжущей части, создание центров кристаллизации гидратных фаз, обеспечение компактной и однородной структуры за счет заполнения пор, гидратацией алита и белита.

Минимизация пустотности тонкодисперсной части бетонного лома за счет компактного распределения более мелких частиц в пустотах крупных частиц во многом обусловлена полимодальным зерновым составом, что способствует оптимизации структуры мелкозернистого бетона и повышению прочности.

Установлены особенности микроструктуры образцов мелкозернистого бетона. При введении в бетонный лом портландцемента образуется компактная структура искусственного конгломерата, с заполнением пор растущими гидратными фазами и тонкодисперсными частицами наполнителя, тем самым обеспечивается омоноличивание структурных элементов многокомпонентной цементной матрицы. У образцов мелкозернистого бетона контрольного состава структура характеризуется слабой контактной зоной между заполнителем и цементной матрицей из-за недостаточного количества вяжущего для обмазки кварцевого песка гидросиликатным гелем, что приводит к снижению прочности при сжатии практически в два раза, по сравнению с исследуемыми образцами на бетонном ломе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lesovik V.S., Tolykina N.M., Glagolev E.C., Tolykina D.A. Reuse of 3D additive manufacturing concrete scrap in construction // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 151. Pp. 1–6.
2. Лесовик В.С., Муртазаев С-А.Ю., Сайдулов М.С. Строительные композиты на основе отсеков дробления бетонного лома и горных пород // Грозный: ФГУП «Издательско-полиграфический комплекс «Грозненский рабочий». 2012. 92 с.
3. Ahmed A.A.A.: Theoretical aspects of using fragments of destroyed buildings and structures of Iraq // *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. 012039.
4. Муртазаев С-А.Ю., Исмаилова З.Х. Использование местных техногенных отходов в мелкозернистых бетонах // *Строительные материалы*. 2008. № 3. С. 57–58.
5. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород: Изд-во БГТУ. 2016. 287 с.
6. Красникова Н.М., Кириллова Е.В., Хозин В. Г. Вторичное использование бетонного лома в качестве сырьевых компонентов цементных бетонов // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 56–65.
7. Олейник П.П., Олейник С.П. Организация системы переработки строительных отходов. М.: МГСУ. 2009. 251 с.
8. Рахимбаев Ш.М., Толпынина Н.М., Хахалева Е.Н. Стойкость материалов гидратационного твердения на заполнителе из бетонного лома // *Вестник Белгородского государственного университета им. В.Г.Шухова*. 2017. №7. С. 6–9.
9. Lesovik R.V., Tolykina N.M., Alani A.A., Al-bo-ali-W.S.J.: Composite Binder on the Basis of Concrete Scrap // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. 95. Pp. 307–312.
10. Лесовик Р.В., Ахмед А.А.А., Аласханов А.Х. Вяжущее из пылевидной фракции фрагментов разрушенных зданий и сооружений Ирака // *Региональная архитектура и строительство*. 2020. 1. № 42. С. 69–76.
11. Rakhimbayev S.M, Tolykina N.M., Khakhaleva E.N., Tolykina D.A. Improving the Cement Systems Corrosion Resistance Based on Clogging Theory. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 974. Pp. 26–30.
12. Rakhimbayev S.M, Tolykina N.M., Khakhaleva E.N., Tolykina D.A. Comparative resistance of concrete with aggregates and fillers of different composition. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1017. Pp. 133–142.
13. Kenai S., Debieb F. Characterisation de la durabilité des betons recycles a base de gros et fins granulés de briques et de betoncincasses. *Mater. And Struct.* 2011. 44(4). С. 815–824.
14. Bochenek A., Prokopski G. Badania Wplywu Stosunku Wodno-Cementowego na Mikro-mechanizm Pecania Betonu Zwyklego. *Arch. Inz. Lad.* 1988. 2, Pp. 261–270.
15. Struble L.J., Stutzman P.E., Fuller E.R.: Microstructural Aspects of The Fracture of Hardened

Cement Paste. J. Amer. Ceram. Soc. 1989. 12, Pp. 2295–2299.

16. Carlo P., Flora F., Christian M. Recycled materials in concrete // Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition). 2019. Vol. 31. No.8. Pp. 19–54.

17. Younis A., Ebead U., Judd S. Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement //

Construction and Building Materials. 2018. Vol. 175. Pp. 152–160.

18. Lesovik V.S., Tolstoy A.D., Alani A.A. Realization of the similarity law in the building material science // Oriental journal of chemistry. 2019. Vol. 35. No. 3. Pp. 1067–1072.

19. Bel J., Park S., Park J. Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates // Construction and Building Materials. 2008. Vol. 9. Pp. 2281–2291.

Информация об авторах

Толыпин Даниил Александрович, студент. E-mail: tolypin.daniil@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Толыпина Наталья Максимовна, доктор технических наук, профессор кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций. E-mail: tolypina.n@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 13.04.2021 г.

© Толыпин Д.А., Толыпина Н.М., 2021

Tolypin D.A., *Tolypina N.M.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: tolypina.n@yandex.ru*

THE EFFECT OF POLYDISPERSE CONCRETE SCRAP OF 3D PRINTING ON THE STRUCTURE FORMATION OF CONCRETE

Abstract. *The article considers the influence of polydisperse concrete scrap of 3D printing on the structure formation of concrete during its repeated application. It is established that the favorable effect on the strength is due to the presence of thin layers on the surface of the secondary fine aggregate in the form of hydrate phases that enhance adhesion to the forming cement matrix. At the same time, an important multifunctional role is played by a fine fraction consisting of a cement matrix with a small amount of pulverized clinker and quartz. It increases the volume of the binder part; performs the function of the centers of crystallization of hydrate phases; promotes the formation of a compact and homogeneous structure by filling the pores; increases the strength due to the hydration of the minerals alite and belite. It is shown that the minimization of the voidness of the fine-grained part of the concrete scrap is largely due to the polymodal grain composition, which contributes to the optimization of the structure of fine-grained concrete and increases the strength. The features of the microstructure of fine-grained concrete samples are established. Artificial conglomerate based on concrete scrap is characterized by a compact structure, due to the high adhesion of the fine aggregate to the cement matrix of concrete, filling the pores with hydrate phases and fine particles, in contrast to the samples of fine-grained concrete of the control composition, which structure is characterized by a weak contact zone between the aggregate and the cement matrix.*

Keywords: *concrete scrap, structure, granulometry, filler, fine-grained concrete.*

REFERENCES

1. Lesovik V.S., Tolypina N.M., Glagolev E.C., Tolyin D.A. Reuse of 3D additive manufacturing concrete scrap in construction. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol.151. Pp. 1–6.

2. Lesovik V.S., Murtazaev S-A.Yu., Saidumov M.S. Construction composites based on screenings of crushing concrete scrap and rocks [Stroitel'nye kompozity na osnove otsevo drobleniya betonogo loma i gornyh porod]. Grozny: FSUE "Publishing and printing complex "Grozny worker", 2012. 92 p. (rus)

3. Ahmed A.A.A. Theoretical aspects of using fragments of destroyed buildings and structures of Iraq. Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 945. 012039.

4. Murtazaev S-A.Yu., Ismailova Z.Kh. The use of local technogenic waste in fine-grained concrete [Ispol'zovanie mestnyh tekhnogennyh othodov v melkozernistykh betonah]. Construction Materials. 2008. No. 3. Pp. 57–58. (rus)

5. Lesovik V.S. Geonics (geomimetics). Examples of implementation in construction materials science: monograph [Geonika (geomimetika). Primery

realizacii v stroitel'nom materialovedenii: monografiya]. Belgorod: BSTU Publishing House, 2016. 287 p. (rus)

6. Krasnikova N.M., Kirillova E.V., Khozin V.G. Secondary use of concrete scrap as raw components of cement concretes [Vtorichnoe ispol'zovanie betonnoogo loma v kachestve syr'evykh komponentov cementnykh betonov]. Construction materials. 2020. No. 1-2. Pp. 56–65. (rus)

7. Oleynik P.P., Oleynik S.P. Organization of the system for processing construction waste [Organizaciya sistemy pererabotki stroitel'nykh othodov]. M.: MGSU, 2009. 251 p. (rus)

8. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N. Resistance of hydration hardening materials on concrete scrap aggregate [Ctojnost' materialov gidracionnogo tverdeniya na zapolnitele iz betonnoogo loma]. Bulletin of the Belgorod State University named after V. G. Shukhov. 2017. No. 7. Pp. 6–9. (rus)

9. Lesovik R.V., Tolypina N.M., Alani A.A., Al-bo-ali-W.S.J. Composite Binder on the Basis of Concrete Scrap. Lecture Notes in Civil Engineering. 2020. Vol. 95. Pp. 307–312.

10. Lesovik R.V., Ahmed A.A.A., Alaskhanov A.Kh. Astringent from the pulverized fraction of fragments of destroyed buildings and structures in Iraq. Regional architecture and construction [Vyazhushchee iz pylevidnoj frakcii fragmentov razrushennykh zdaniy i sooruzhenij Iraka]. 2020. No. 42. Pp. 69–76. (rus)

11. Rakhimbayev S.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N., Tolypin D.A. Improving the Cement Systems Corrosion Resistance Based on Clogging Theory. Materials Science Forum. 2020. Vol. 974. Pp. 26–30.

12. Rakhimbayev S.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N., Tolypin D.A. Comparative resistance of concrete with aggregates and fillers of different composition. Materials Science Forum. 2021. Vol. 1017. Pp. 133–142.

13. Kenai S., Debieb F. Characterisation de la durabilité des betons recyclés a base de gros et fins granulés de briques et de bétoncincasses. Mater. And Struct. 2011. No. 44. Pp. 815–824.

14. Bochenek A., Prokopski G. Badania Wplywu Stosunku Wodno-Cementowegona Mikro-mechanism Pecania Betonu Zwyklego. Arch. Inz. Lad. 1988. Vol. 2. Pp. 261–270.

15. Struble L.J., Stutzman P.E., Fuller E.R. Microstructural Aspects of The Fracture of Hardened Cement Paste. J. Amer. Ceram. Soc. 1989. Vol. 12. Pp. 2295–2299.

16. Carlo P., Flora F., Christian M. Recycled materials in concrete. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition). 2019. Vol.31. No. 8. Pp. 19–54.

17. Younis A., Ebead U., Judd S. Life cycle cost analysis of structural concrete using seawater, recycled concrete aggregate, and GFRP reinforcement. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 175. Pp. 152–160.

18. Lesovik V.S., Tolstoy A.D., Alani A.A. Realization of the similarity law in the building material science. Oriental journal of chemistry. 2019. Vol. 35. No. Pp. 1067–1072.

19. Bel J., Park S., Park J. Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials. 2008. Vol. 9. Pp. 2281–2291.

Information about the authors

Tolypin, Daniil A. Student. E-mail: tolypin.daniil@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Tolypina, Natalia M. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Building Materials Science, Products and Structures. E-mail: tolypina.n@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 13.04.2021

Для цитирования:

Тольпин Д.А., Тольпина Н.М. Влияние полидисперсного бетонного лома 3D-печати на структурообразование бетона // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 7. С. 17–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-17-23

For citation:

Tolypin D.A., Tolypina N.M. The effect of polydisperse concrete scrap of 3D printing on the structure formation of concrete. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. No. 7. Pp. 17–23. DOI: 10.34031/2071-7318-2021-6-7-17-23