DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-2-12-18

Толыпин Д.А.,
Толыпина Н.М.*, доктор технических наук, профессор,
Белгородский технологический государственный
университет им. В.Г. Шухова, Россия
*Ответственный автор E-mail: tolypina.n@yandex.ru

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПЕРЕРАБОТКИ БЕТОННОГО ЛОМА 3D-ПЕЧАТИ

Аннотация: в статье предложен рациональный способ переработки бетонного лома 3D-печати с использованием виброоборудования, что позволяет получать многокомпонентный строительный материал при минимальном потреблении электроэнергии. В качестве критерия степени измельчения бетонного лома предложено использовать удельную поверхность тонкодисперсной части бетонного лома, которая должна соответствовать 400-500 м²/кг. Показана возможность повторного использования полученного продукта вместо традиционного мелкого заполнителя из кварцевого песка. Выявлено, что бетонный лом без добавления портландцемента твердеет, достигая к 28 сут до 48% прочности при сжатии контрольных образцов. При добавлении в продукт переработки бетонного лома 10% вяжущего ЦЕМ I 42,5 Н прочность при сжатии мелкозернистого бетона повысилась на 106,6%, а 20% портландцемента – на 112,2%, по сравнению с прочностью контрольных образцов аналогичного состава на традиционном кварцевом песке через 28 сут твердения. Отмечено, что в первую очередь это обусловлено слабой контактной зоной кварцевого песка и цементной матрицы бетона. Применение продукта переработки бетонного лома позволяет получать строительные композиты на его основе при полном исключении природного сырья.

Ключевые слова: бетонный лом, мелкозернистый бетон, прочность, микроструктура, гранулометрия

Введение

Бетонный лом 3D-печати представляет собой сложную многокомпонентную систему из кварцевого песка, цементной матрицы бетона, негидратированного клинкера, что предопределяет возможность на его основе получать эффективный строительный материал для повторного применения [1-4]. К технологически важным способам переработки бетонного лома 3D-печати следует подходить с позиций, предъявляемым к прогрессивным технологиям, основными показателями которых являются: расход природного сырья, производительность, количество энергозатрат – тепловых и электроэнергии, остальные критерии оптимальности носят второстепенный характер [5-6]. В этой связи переработка бетонного лома 3D-печати должна быть направлена на получение продукта с минимальными энергозатратами и возможности его повторного использования без дополнительных природных или техногенных ресурсов или их полном исключении. При выборе способа переработки бетонного лома 3D-печати следует учитывать многокомпонентность системы (цементная матрица бетона, кварцевый песок, негидратированный клинкер), составные элементы которой отличаются различной размолоспособностью и функциональными свойствами [7-15]. Проблема рациональной переработки бетонного лома 3D-печати требует применения новых эффективных способов.

Целью работы является получение строительного материала на основе бетонного лома 3D-печати с минимальными затратами электроэнергии при максимальном выпуске продукции высокого качества.

Методы и материалы

Бетонный лом получали дроблением мелкозернистого бетона (Ц:П=1:4), заформованного по 3D-технологии в лабораторных условиях на основе цемента ЦЕМ I, ЦЕМ II, ЦЕМ III и кварцевого песка фракции 0,16-1,25 мм. После твердения в течение 10-12 месяцев в воздушно-сухих условиях, бетон подвергали дроблению на лабораторной щековой дробилке и кратковременному помолу в лабораторной вибромельнице. Гранулометрический состав определяли по ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Влияние продуктов дробления бетонного лома на кинетику твердения мелкозернистого бетона определяли на образцах 3х3х3 см. Особенности структурообразования мелкозернистого бетона исследовали с помощью растрового электронного микроскопа «TESCAN MIRA 3 LMU» лаборатории Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Результаты и обсуждения

Для получения эффективного строительного материала на основе бетона 3D-печати очень важным этапом является выбор мельницы. Предпочтительно в качестве помольного агрегата использовать вибромельницы, так как измельчение происходит в основном за счет отшелушивания поверхностных слоев цементной матрицы с поверхности зерен кварцевого песка вследствие усталостного разрушения. При этом, благодаря большому количеству соударений шаров в единицу времени, несмотря на малую силу удара шаров, доля затрат на образование новых поверхностей выше, чем на обеспечение упругих деформаций частиц измельчаемых материалов. В этом плане отшелушивающий принцип действия вибрационных мельниц дает значительное преимущество перед другими типами мельниц – шаровыми, каскадными, роликовыми, струйными и др. для получения многокомпонентной смеси из мелкого заполнителя и тонкодисперсной части (цементной матрицы и вяжущего). Следует учесть, что измельчение до одинаковой удельной поверхности происходит в 10-20 раз быстрее, чем в шаровой мельнице, при меньшем удельном расходе электроэнергии.

Дробленый бетонный лом 3D-печати (0-2,5мм), измельчали в вибрационной лабораторной мельнице таким образом, чтобы с поверхности кварцевого песка происходило отшелушивание цементной матрицы и ее помол, без измельчения мелкого заполнителя, что обеспечивается существенной разницей в размолоспособности цементного камня и кварцевого песка. При этом контролировали удельную поверхность продукта помола и удельную поверхность фракции менее 0,16 мм. Гранулометрический состав бетонного лома и мелкого заполнителя бетона приведен в табл. 1 и на рис. 1.

Рис. 1. Гранулометрические кривые кварцевого песка и бетонного лома:

1 – кварцевый песок ($M_{кр}=1,5$); 2 – бетонный лом ($M_{кр}=1,1$; $S_{уд.общ}=150 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{уд<0,16}=510 \text{ м}^2/\text{кг}$); 3 – бетонный лом ($M_{кр}=1,2$; $S_{уд.общ}=135 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{уд<0,16}=420 \text{ м}^2/\text{кг}$)

Fig. 1. Granulometric curves of quartz sand and concrete scrap: 1 – quartz sand ($M_s=1.5$); 2 – concrete scrap ($M_s=1.1$; $S_{sp.total}=150 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{sp<0.16}=510 \text{ м}^2/\text{кг}$); 3 – concrete scrap ($M_s=1.2$; $S_{sp.total}=135 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{sp<0.16}=420 \text{ м}^2/\text{кг}$)

Таблица 1

Гранулометрический состав кварцевого песка и бетонного лома на его основе

Table 1

Granulometric composition of quartz sand and concrete scrap based on it

Показатели	Размер отверстий сит, мм					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	дно
Кварцевый песок, $M_{кр}=1,5$						
Частные остатки, %	0	0	5,4	56,1	36,4	2,1
Полные остатки, %	0	0	5,4	61,5	97,9	100
Бетонный лом, $M_{кр}=1,2$, $S_{уд.общ}=135 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{уд<0,16}=420 \text{ м}^2/\text{кг}$						
Частные остатки, %	0	0	4,8	38,8	28,2	28,1
Полные остатки, %	0	0	4,8	43,7	71,9	100
Бетонный лом, $M_{кр}=1,1$, $S_{уд.общ}=150 \text{ м}^2/\text{кг}$, $S_{уд<0,16}=510 \text{ м}^2/\text{кг}$						
Частные остатки, %	0	0	4,7	35,6	27,9	31,7
Полные остатки, %	0	0	4,7	40,4	68,3	100

Из анализа гранулометрических кривых бетонного лома с различной удельной поверхностью следует, что смесь характеризуется практически одинаковым зерновым составом, она содержит частично очищенный и измельченный кварцевый песок (68-72%) и пылевидную фракцию (28-32%), из тонкодисперсной цементной матрицы, пылевидного кварца и клинкера. Частные остатки бетонного лома уменьшаются на ситах 0,16 и 0,316 до 27,9-38,8%, однако увеличивается количество пылевидной фракции до 28,1-31,7% по сравнению с использованным кварцевым песком.

На основе полученной смеси формовали образцы 3х3х3 см, твердевшие в воздушно-влажностных условиях, результаты испытаний приведены в табл. 2 и на рис. 2. Экспериментальные данные показывают, что материал, полученный кратковременным помолом бетонного лома в вибромельнице, по своим функциональным свойствам превосходит традиционный мелкий заполнитель из кварцевого песка.

Таблица 2

Кинетика набора прочности при сжатии образцов мелкозернистого бетона

Table 2

Kinetics of compressive strength gain of fine-grained concrete samples

№	Бетонный лом, %	ЦЕМ I 42,5 Н, %	Кв. песок, %	В/Ц	В/Т	Предел прочности при сжатии, МПа			
						2 сут	7сут	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 ($S_{уд \cdot общ}=1350 \text{ см}^2/\text{г}$, $S_{уд < 0,16}=4200 \text{ см}^2/\text{г}$)									
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 ($S_{уд \cdot общ}=1500 \text{ см}^2/\text{г}$, $S_{уд < 0,16}=5100 \text{ см}^2/\text{г}$)									
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

Бетонный лом (рис. 1, кривые 2 и 3), способен твердеть без вяжущего, достигая к 28 сут до 48% прочности при сжатии контрольных образцов. Бетон, применяемый для 3D-печати, как правило содержит до 20 % портландцемента, поэтому в полученную смесь вводили 10% и 20% вяжущего ЦЕМ I 42, 5 Н. Это позволило получить на его основе мелкозернистый бетон с прочностью на 106,6% выше через 28 сут твердения, чем прочность контрольных образцов, а ввод 20% портландцемента – на 112,2%. Таким образом применение бетонного лома вместо традиционного мелкого заполнителя из кварцевого песка повышает прочность более, чем в два раза, как в ранние так и нормативные сроки (рис. 2).

Способностью к гидратационному твердению обладает только тонкодисперсная часть бетонного лома, содержащая негидратированную часть клинкера. С увеличением удельной поверхности тонкодисперсной части бетонного лома от 420 до 510 м²/кг прочность при сжатии образцов возрастает незначительно на 5-10%, следовательно, для получения конгломерата с заданными структурно-механическими свойствами целесообразно использовать бетонный лом, пылевидная фракция которого характеризуется удельной поверхностью 400-500 м²/кг. Следовательно, необходимо контролировать при помоле удельную поверхность только тонкодисперсной части бетонного лома, а не всей смеси.

Рис. 2. Предел прочности при сжатии образцов мелкозернистого бетона через 14 и 28 сут твердения:

1 – контрольный состав (ПЦ-20%, кв. песок-80%); бетонный лом ($S_{уд<0,16}=4200 \text{ см}^2/\text{г}$); 2 – ПЦ-0%, бет. лом.-100%; 3 – ПЦ-10%, бет. лом.-90%; 4 – ПЦ-20%, бет. лом.-80%; бетонный лом ($S_{уд<0,16}=5100 \text{ см}^2/\text{г}$); 5 – ПЦ-0%, бет. лом.-100%; 6 – ПЦ-10%, бет. лом.-90%; 7 – ПЦ-20%, бет. лом.-80%

Fig. 2. Compressive strength of fine-grained concrete samples after 14 and 28 days of hardening:

1 – control composition (PC-20%, q. sand-80%); concrete scrap ($S_{sp<0.16}=4200 \text{ cm}^2/\text{g}$); 2 – PC-0%, conc. scrap.-100%; 3 – PC-10%, concr.scrap.-90%; 4 – PC-20%, concr.scrap.-80%; concrete scrap ($S_{sp<0.16}=5100 \text{ cm}^2/\text{g}$); 5 – PC-0%, concr.scrap.-100%; 6 – PC-10%, concr.scrap.-90%; 7 – PC-20%, concr. scrap-80%

Как видно из приведенных на рис. 2 данных, контрольные образцы мелкозернистого бетона на кварцевом мелком заполнителе существенно уступают по прочности образцам на бетонном ломе. В первую очередь это обусловлено слабой контактной зоной со значительным количеством крупных пор между кварцевым песком и цементной матрицей бетона (рис. 3 а, б). Прочность мелкозернистого на основе бетонного лома 3D-печати – результат химических, физико-химических и физико-механических процессов, в которых кварцевый песок, цементная матрица бетона и негидратированный клинкер принимают самое активное участие.

Из-за недостаточного количества вяжущего в мелкозернистом бетоне 3D-печати (Ц:П=1:4) не все частицы мелкого заполнителя покрыты цементной оболочкой (рис.3 а), между зерном кварца и цементной матрицей наблюдается зазор. При этом после дробления и кратковременного помола бетонного лома в вибромельнице на зернах кварцевого песка остаются слои в виде тонких пленок гидратных фаз, что обеспечивает повышенную адгезию формирующейся цементной матрицы бетона ко вторичному мелкому заполнителю. При этом большая часть цементной пленки, прочно закрепившейся на поверхности кислого заполнителя из кварцевого песка в процессе предыдущей эксплуатации и повторного дробления, карбонизируется.

Рис. 3. Микроструктура образцов: а) контрольный состав (ПЦ – 20%, кв. песок – 80%); б) ПЦ – 20%, бет. лом. – 80%

Fig. 3. Microstructure of samples: а) control composition (PC – 20%, q. sand – 80%); б) PC – 20%, con. scrap. – 80%

Благодаря химическому сродству гидратных образований на поверхности кварцевого песка и цементной матрицы поверхность контакта между ними «размыта» и характеризуется наноразмерными величинами (3,б). Кроме того при дроблении и помоле бетонного лома образующиеся новые поверхности на частицах кварцевого заполнителя обладают более высокой поверхностной энергией, что объясняется образованием ненасыщенных валентных связей Si^{4+} , O^{2-} в результате разрыва силоксановых связей Si-O , что дает дополнительное повышение их адгезионной активности.

Выводы

Кратковременный помол бетонного лома в вибрационной мельнице позволяет получать многокомпонентную смесь, содержащую частично очищенный и измельченный кварцевый песок, тонкодисперсный цементный камень с примесью пылевидного кварца и клинкера. Удельная поверхность тонкодисперсного компонента должна находиться в пределах 400–500 м²/кг.

Полученная смесь при твердении в воздушно-влажностных условиях достигает к 28 сут прочность при сжатии около 48% от прочности контрольных цементно-песчаных образцов (Ц:П=1:4). При введении в бетонный лом портландцемента в количестве 10 и 20% наблюдается увеличение прочности при сжатии мелкозернистого бетона на 106,6-112,2% в нормируемый срок по сравнению с контрольным составом.

Таким образом переработка бетона 3D-печати с использованием виброоборудования позволяет получать качественный вторичный продукт с минимальными затратами электроэнергии, что дает возможность его полного повторного использования в производстве бетонов с заданными эксплуатационными свойствами, а также попутно решить экологические и экономические задачи.

Литература

1. Lesovik V.S., Tolypina N.M., Glagolev E.C., Tolypin D.A. Reuse of 3D additive manufacturing concrete scrap in construction // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 151. P. 1 – 6.
2. Лесовик В.С., Муртазаев С-А.Ю., Сайдумов 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 945, 012039 (2020).
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: монография. 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., Толыпина 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., 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. № 95. P. 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. Т. 1. № 42. С. 69 – 76.
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. № 12. P. 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. P. 133 – 142.
13. Kenai S., Debieb F. Caracterisation de la durability des betons recycles a base de gros et fins granulates de briques et de betoncincasses // Mater. And Struct. 2011. № 44 (4). P. 815 – 824.
14. Bochenek A., Prokopski G. Badania Wplywu Stosunku Wodno-Cementowegona Mikromechanism Pecania Betonu Zwyklego // Arch. Inz. Lad. 1988. № 2. P. 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. P. 2295 – 2299.

References

1. Lesovik V.S., Tolypina N.M., Glagolev E.C., Tolypin D.A. Reuse of 3D additive manufacturing concrete scrap in construction. Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. 151. P. 1 – 6.
2. Lesovik V. S., Murtazaev S-A.Yu., Saydumov M.S. Construction composites based on dropouts of concrete scrap and rock crushing. Grozny: 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. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 945, 012039 (2020).
4. Murtazaev S-A.Yu., Ismailova Z.Kh. The use of local technogenic waste in fine-grained concrete. 2008. 3. P. 57 – 58. (rus.)
5. Lesovik V.S. Geonika (geomimetika). Examples of implementation in construction materials science: monograph. 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. 2020. 1-2. P. 56 – 65. (rus.)
7. Oleynik P.P., Oleynik S.P. Organization of the system of processing construction waste. M.: MCCU. 2009. 251 p. (rus.)
8. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M., Khakhaleva E.N. Resistance of hydration hardening materials on concrete scrap aggregate. Bulletin of Belgorod State University named after V.G. Shukhov. 2017. № 7. P. 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. 95. P. 307 – 312.

10. Lesovik R.V., Akhmed A.A.A., Alaskhanov A.Kh. Binder from the dust-like fraction of fragments of destroyed buildings and structures of Iraq. Regional architecture and construction. 2020. 1 (42). P. 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. 974 (12). P. 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. 1017. P. 133 – 142.
13. Kenai S., Debieb F. Caracterisation de la durability des betons recycles a base de gros et fins granulates de briques et de betoncjncasses. Mater. And Struct. 2011. 44 (4). P. 815 – 824.
14. Bochenek A., Prokopski G. Badania Wplywu Stosunku Wodno-Cementowegona Mikromechanism Pecania Betonu Zwyklego. Arch. Inz. Lad. 1988. 2. P. 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. P. 2295 – 2299.

Tolypin D.A.,
Tolypina N.M. *, Doctor of Engineering Sciences (Advanced Doctor), Professor,
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia
* Corresponding author E-mail: tolypina.n@yandex.ru

AN EFFECTIVE WAY TO RECYCLE 3D PRINTING CONCRETE SCRAP

Abstract: the article proposes a rational method for processing 3D printing concrete scrap using vibration equipment, which allows obtaining a multicomponent building material with minimal electricity consumption. As a criterion for the degree of grinding of concrete scrap, it is proposed to use the specific surface area of the finely dispersed part of concrete scrap, which should correspond to 400-500 m²/kg. The possibility of reusing the resulting product instead of the traditional fine aggregate of quartz sand is shown. It was found that the concrete scrap without the addition of Portland cement hardens, reaching up to 48% of the compressive strength of the control samples by 28 days. When 10% of the binder CEM I 42.5 N was added to the concrete scrap processing product, the compressive strength of fine-grained concrete increased by 106.6%, and 20% of Portland cement - by 112.2 %, compared to the strength of control samples of a similar composition on traditional quartz sand after 28 days of hardening. It is noted that this is primarily due to the weak contact zone of quartz sand and the cement matrix of concrete. The use of the product of processing concrete scrap allows obtaining building composites based on it with the complete exclusion of natural raw materials.

Keywords: concrete scrap, fine-grained concrete, strength, microstructure, granulometry

Для цитирования: Толыпин Д.А., Толыпина Н.М. Эффективный способ переработки бетонного лома 3d-печати // Строительные материалы и изделия. 2021. Том 4. № 2. С. 12 – 18. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-2-12-18

For citation: Tolypin D.A., Tolypina N.M. Effective method of processing 3D printing concrete scrap. Construction Materials and Products. 2021. 4 (2). P. 12 – 18. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-2-12-18

Поступила в редакцию 12 января 2021 г.

Принята в доработанном виде 19 февраля 2021 г.

Одобрена для публикации 2 марта 2021 г.

Received: January 12, 2021.

Revised: February 19, 2021.

Accepted: March 2, 2021.