

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.32 : 625.731

Г.И. ОВЧАРЕНКО, Е.Е. ИБЕ, А.В. ВИКТОРОВ

ДОРОЖНЫЕ ОСНОВАНИЯ ИЗ УКРЕПЛЕННОГО БЕТОННОГО ЛОМА *

Объектом исследования является бетонный лом от переработки брака конструкций на заводах ЖБИ и сноса зданий. На основе анализа фазового состава лома рассматривается технология его контактного твердения при прессовании при удельных давлениях от 20 до 100 МПа. Исходный лом фракций 0–1,25 или 0–5 мм после прессования характеризуется низкой прочностью и нулевой морозостойкостью. Рассмотрены эффективные добавки к лому, обеспечивающие повышение его контактной прочности. Активные микро- и нанокремнеземы увеличивают ее в 1,5 раза, низкоосновные алюминаты кальция в виде глиноземистого цемента и высокоглиноземистого шлака – в 2,5–3 раза. Исследованы композиции из бетонного лома фракции 0–5 мм и высокоглиноземистого шлака в качестве дорожных оснований, обеспечивающих требуемую прочность и морозостойкость. Высокие характеристики прессованного камня из лома и низкоосновных алюминатов объясняются быстрой перестройкой гексагональных гидроалюминатов в кубический C_3AH_6 при прессовании с образованием большого количества контактно-активного геля $Al(OH)_3$.

Ключевые слова: дорожное основание, бетонный лом, цементная фаза C-S-H, контактная прочность, добавки, портландит, высокоглиноземистый шлак, гидратация.

DOI 10.32683/0536-1052-2018-719-11-50-57

Введение. Вопрос переработки бетонного лома в отечественной литературе [1] и за рубежом поднят давно. Главная его направленность – извлечение вторичного щебня с обеспечением экономических и экологических предпочтений. Несмотря на развитие специальной техники по разрушению железобетонных конструкций с извлечением арматуры и получением дробленого бетона [2–5], внедрение таких технологий сдерживается из-за пониженного качества вторичного щебня [6, 7], ограничения его использования в бетонах по сумме показателей [8, 9].

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-43-220005 р_а «Фундаментальные основы усиления вяжущих свойств цементной фазы C-S-H».

© Овчаренко Г.И., Ибе Е.Е., Викторов А.В., 2018

Гидратированный цемент в бетонном ломе, состоящий преимущественно из фазы С-S-H и портландита, мог бы рассматриваться в качестве исходного необходимого компонента вяжущих контактного твердения (контактно-конденсационные вяжущие) [10–12]. Однако первые поисковые эксперименты выявили недостаточно высокую прочность и морозостойкость таких материалов.

Проведенные нами исследования на чистой фазе С-S-H с добавками [13] показали некоторые пути значительного увеличения прочностных характеристик камня контактного твердения. Для фазы С-S-H в качестве добавок выступают портландит, микро- и нанокремнеземы, низкоосновные алюминаты кальция. Поэтому в данной статье рассматривается влияние этих добавок на свойства строительных материалов из бетонного лома.

Немаловажными вопросами являются сроки твердения исходного бетона, а также фракционный состав бетонного лома, направляемого на контактное твердение. Переработка брака железобетонных конструкций на заводах ЖБИ предполагает наличие остаточного резерва негидратированного цемента. И, напротив, длительно твердевший бетон в старых зданиях и сооружениях будет в значительной степени прогидратированным и более закарбонизованным. Фракционный же состав может представлять собой как песчаную фракцию, так и домолотый материал до разной удельной поверхности (или фракционного состава). Оптимизация переработки лома для контактных вяжущих – важная технологическая задача.

Материалы и методы исследования. Бетонный лом в виде кусков 200–300 мм был получен при переработке брака конструкций на заводе «ЖБИ Сибири» (г. Барнаул) специализированной организацией. Для вяжущих контактного твердения бетонный лом в лаборатории дробился и рассеивался на фракции 0–1,25; 0–2,5; 0–5,0 и 0–10 мм.

В качестве активаторов твердения лома использовали доменный гранулированный шлак (ДГШ) ЗАПСИБа (г. Новокузнецк), микрокремнезем (МК) завода «Кузнецкие ферросплавы», кремнезоль (50 нм) с содержанием SiO₂ 30 % и алюмозоль (80–200 нм) с содержанием Al₂O₃ 20 % Казанского НТЦ «Компас», глиноземистый цемент CIMSA ISIDAC 40 (Турция), высокоглиноземистый шлак алюминотермического производства по ТУ 14-00186482-048-03, портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5 Н Искитимского завода. В ходе работы изготавливались образцы-цилиндры диаметром и высотой 50 мм. Формование осуществлялось при давлениях прессования 20–100 МПа. Образцы испытывались через 1 ч после формования, после 28 и 90 сут нормального твердения или пропаривания при 80 °С по режиму 3+6+3 ч.

Результаты и их обсуждение. Влияние дисперсности растворной части бетонного лома на контактную прочность через 1 ч после прессования дано на рис. 1.

Как видно из рис. 1, на прессование наиболее эффективно направлять фракцию 0–2,5 мм. Однако прочность камня и из фракции 0–5 мм незначительно отстает от камня из предыдущей фракции, но получение более крупной фракции технически значительно проще.

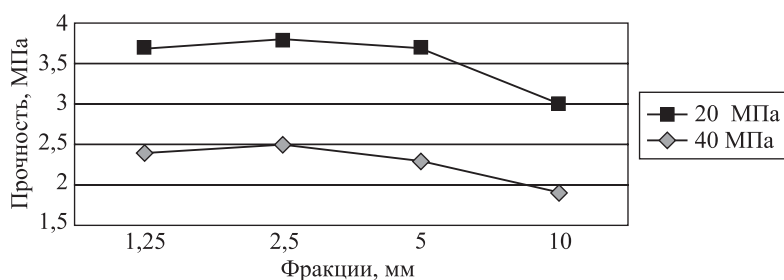


Рис. 1. Зависимость прочности камня контактного твердения из бетонного лома разных фракций после прессования при 20 и 40 МПа через 1 ч после формования

$$R = (,33295747769e-3) * P^2 + (-,0025488147644) * t^2 + (,00266128750965) * P * t + (3,3562401995348)$$

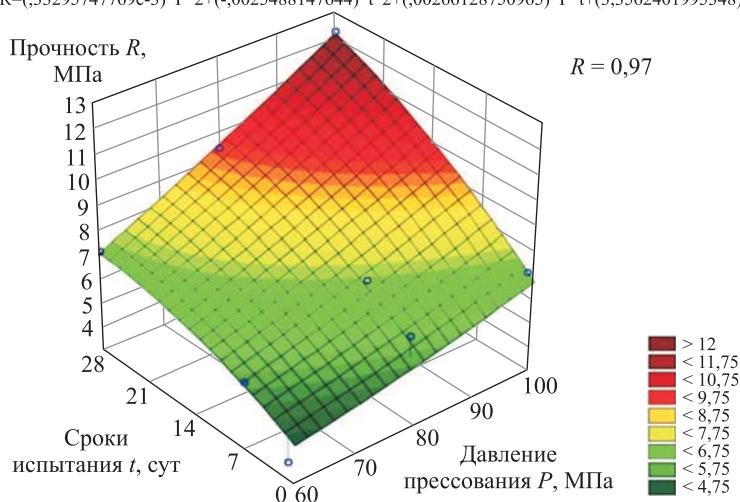


Рис. 2. Кинетика набора прочности прессованного бетонного лома

Контактная прочность камня при высоких давлениях прессования лома фракции 0–1,25 приведена на рис. 2. Ранняя (собственно контактная) прочность лома даже такой мелкой фракции невысока и при очень высоких удельных давлениях. После выдержки в нормальных условиях прочность камня повышается почти в 2 раза, но надо иметь в виду, что данный бетонный лом имел клинкерный резерв, так как перерабатывался из брака на заводе ЖБИ.

Нами исследована ранняя (сырцовая), нормативная (28 сут нормального выдерживания) и прочность после пропаривания прессованного бетонного лома с различными минеральными добавками: молотые известняк, доменный гранулированный шлак, высокоглиноземистый шлак (ВГШ), глиноземистый цемент (ГЦ), микрокремнезем, кварцевый песок естественной гранулометрии, а также кремнезоль и алюмозоль. Также оценивалось влияние добавок портландцемента в количестве 5, 10 и 15 %.

Многочисленные эксперименты показали, что минеральные добавки, способные вступать во взаимодействие с продуктами гидратации цемента лома, обеспечивают прирост прочности вследствие пуццолановой реакции между портландитом лома и активным кремнеземом (или глиноземом) добавки (таблица).

Прочность прессованных образцов из бетонного лома с добавками, МПа

Состав	Минеральная добавка	Условия твердения		
		1 ч нормальные условия (сырец)	ТВО 3+6+3 ч при 80 °С	28 сут нормальные условия
1	–	7 (3)	8 (5)	11 (7)
2	ДГШ	6 (3)	12 (8)	13 (11)
3	МК	6 (4)	14 (9)	16 (11)
4	Кремнезоль	11 (7)	–	18 (12)
5	Алюмозоль	6,5 (5)	–	14 (11)
6	ГЦ	9 (5)	–	27 (5)
7	ВГШ	26 (22)	–	34 (24)

Примечание. В скобках показана прочность при удельном давлении прессования 60 МПа, без скобок – 100 МПа; составы 1–3 прессовали из лома фракции 0–1,25 мм, 4–7 – из лома фракции 0–5 мм.

Как видно из таблицы, прочность возрастает в 1,5–1,65 раза при введении активных кремнеземов и в 2,5–3 раза при добавлении ГЦ и ВГШ, содержащих низкоосновные алюминаты кальция.

Механизмы упрочнения камня для различных видов добавок – разные. Для активных кремнеземов – это пуццолановая реакция с портландитом с образованием большего количества геля С-S-H, для низкоосновных алюминатов – параллельное образование геля Al(OH)₃ с саморазогревом смеси в присутствии портландита и быстрой перестройкой гексагональных гидроалюминатов в кубический гидрат C₃AH₆ [13].

На основе полученных данных были разработаны технологии устройства дорожного основания и изготовление мелкоштучных стеновых и дорожных материалов из бетонного лома и высокоглиноземистого шлака¹.

Требования к дорожным основаниям, изложенные в ГОСТ 23558–94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия», заключаются в обеспечении прочности на сжатие в 90-суточном возрасте 2–10 МПа (при соответствующей прочности на изгиб) и коэффициента морозостойкости не менее 0,75 (75 % остаточной прочности) после испытания на морозостойкость при 25 циклах для районов со среднемесячной температурой наиболее холодного месяца от –15 до –30 °С.

Развитие прочности на сжатие во времени прессованной композиции из бетонного лома фракции 0–5 мм и добавки ВГШ показано на рис. 3.

Как видно из рис. 3, составы композиций могут обеспечить весь диапазон требований по прочности для укрепленных дорожных оснований.

¹ Заявка № 2017129217/03(050535) на патент «Способ переработки бетонного лома» от 15.08.2017 г. Овчаренко Г.И., Викторов А.В., Назаров Д.М. (заявка находится на рассмотрении в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (Бережковская наб., д. 30, корп. 1, г. Москва, Г-59, ГСП-3, 125993, Российская Федерация)).

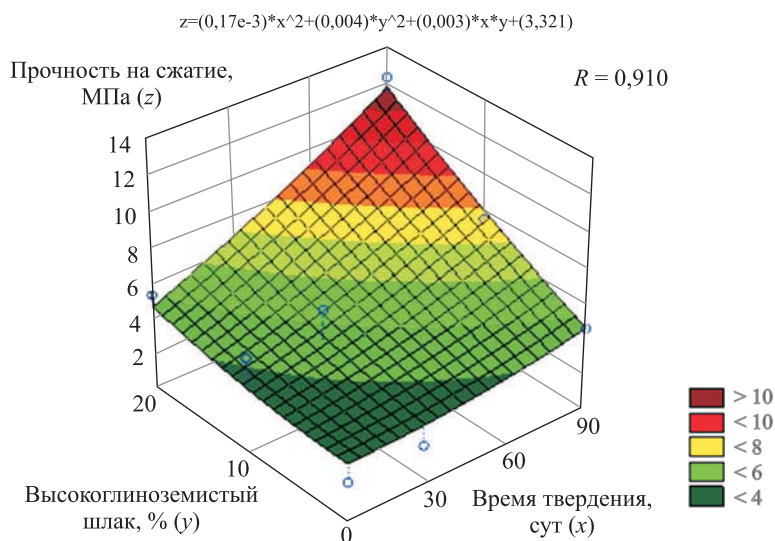


Рис. 3. Прочность при сжатии прессованной при 20 МПа композиции из бетонного лома и высокоглиноземистого шлака

Проверка требований по морозостойкости показала, что бетонный лом без добавок не выдержал и одного цикла замораживания и оттаивания, полностью разрушившись. Водонасыщенные образцы из бетонного лома с 10 и 20 % ВГШ выдержали испытания при 25 циклах с коэффициентами морозостойкости соответственно 0,84 и 0,80.

Следует отметить, что добавление 5 и 10 % портландцемента (ПЦ) к смеси лома и ВГШ не увеличивает прочность композиций (рис. 4). Кроме того, при давлении прессования 20 МПа до 28 сут твердения прочность камня с 5 % ПЦ опережает прочность с 10 % ПЦ. И только при давлении прессования 40 МПа отмечается небольшое опережение прочности у состава с большим расходом ПЦ. Это говорит о том, что давления 20 МПа недостаточно для быстрой перестройки гексагональных гидроалюминатов при гидратации ВГШ в кубический C_3AH_6 . Большие добавки ПЦ стимулируют эту перестройку с соответствующей потерей прочности. И только к 90 сут самопроизвольный переход гексагональных гидроалюминатов в кубический завершается и ПЦ выполняет не деструктивную, а упрочняющую функцию.

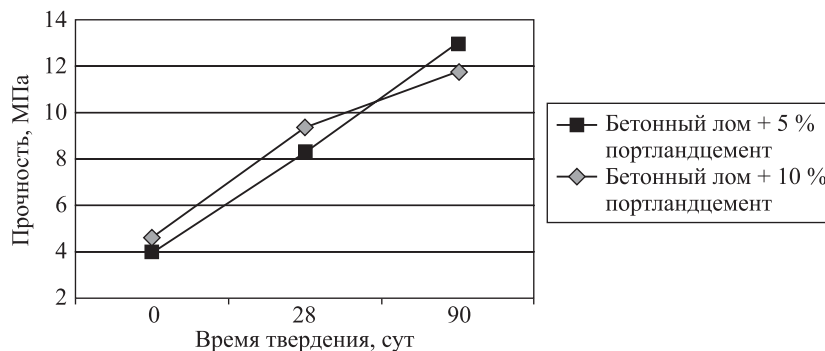


Рис. 4. Прочность при сжатии прессованной при 20 МПа композиции из бетонного лома, 20 % ВГШ, 5 и 10 % ПЦ

Выводы. 1. При переработке бетонного лома на композиции контактного твердения можно ограничиться его фракцией в 0–5 мм без дополнительного измельчения.

2. Исходный бетонный лом, несмотря на клинкерный резерв, показывает низкие контактные прочностные показатели при прессовании и нулевую морозостойкость.

3. Добавки активных микро- и нанокремнеземов увеличивают контактную прочность лома в 1,5–1,65 раза, а низкоосновных алюминатов в виде глиноземистого цемента и высокоглиноземистого шлака – в 2,5–3 раза. Это обусловлено пуццолановой реакцией кремнеземов с портландитом лома в первом случае и образованием геля Al_2O_3 – во втором.

4. Прессованные при 20 МПа композиции из бетонного лома с 10–20 % высокоглиноземистого шлака обеспечивают необходимые характеристики дорожного основания по прочности и морозостойкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев Б.В., Загурский В.А. Вторичное использование бетонов. М.: Стройиздат, 1988. 96 с.
2. Bravo M., De Brito J., Pontes J., Evangelista L. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants // *Construction and Building Materials*. 2015. No. 77. P. 357–369.
3. Ledesma E.F., Jimenez J.R., Ayuso J., Fernandez J.M., De-Brito J. Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production Part-I: ceramic masonry waste // *Journal of Cleaner Production*. 2015. No. 87. P. 692–706.
4. Özalp F., Yılmaz H.D., Kara M., Kaya O., Şahin A. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes // *Construction and Building Materials*. 2016. No. 110. P. 17–23.
5. Ossa A., García J.L., Botero E. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry // *Journal of Cleaner Production*. 2016. No. 135. P. 379–386.
6. Rahal K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate // *Build. Environ*. 2007. No. 1. P. 407–415.
7. Yang K.H., Chung H.S., Ashour A. Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties // *ACI Mater. J*. 2008. No. 3. P. 289–296.
8. Evangelista L., Brito J. Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregate // *Cem. Concr. Compos*. 2007. No. 5. P. 397–401.
9. López-Gayarre F., Serna P., Domingo-Cabo A., Serrano-López M.A., López-Colina C. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties // *Waste Manag*. 2009. No. 12. P. 3022–3028.
10. Глуховский В.Д., Рунова Р.Ф., Максуннов С.Е. Вяжущие и композиционные материалы контактного твердения. Киев: Выща шк., 1991. 242 с.
11. Рунова Р.Ф., Максуннов С.Е. Перспективы использования вяжущих контактно-конденсационного твердения в композиционных материалах // *Цемент*. 1990. № 6. С. 54–56.
12. Soroka I., Sereda P.J. The structure of cement-stone // *Proceedings of the Fifth International symposium of the chemistry of cement*. Tokio, 1968. P. 3. Vol. 3. P. 67–73.

13. Овчаренко Г.И., Ибе Е.Е., Садрашева А.О., Викторов А.В. Контактная прочность цементной фазы C-S-H с добавками // Изв. вузов. Строительство. 2018. № 8. С. 48–57.

Овчаренко Геннадий Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: egogo1980@mail.ru
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул
Ибе Екатерина Евгеньевна, канд. техн. наук; E-mail: Katerina.ibe@mail.ru
Сибирский федеральный университет, г. Абакан
Викторов Артем Владимирович, ассист.; E-mail: artem.viktorov2011@yandex.ru
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Получено 17.10.18

Ovcharenko Gennadiy Ivanovich, DSc, Professor; E-mail: egogo1980@mail.ru
Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia
Ibe Ekaterina Evgen'evna, PhD; E-mail: Katerina.ibe@mail.ru
Siberian Federal University, Abakan, Russia
Viktorov Artem Vladimirovich, Assistant; E-mail: artem.viktorov2011@yandex.ru
Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

ROAD BASES FROM STRENGTHENED CONCRETE SCRAP

The object of the research is concrete scrap from the processing of defective structures in concrete products plants, the demolition of buildings. Based on the analysis of the phase composition of scrap, the technology of its contact hardening during pressing at specific pressures from 20 to 100 MPa is considered. Initial scrap of fractions 0–1,25 or 0–5 mm after pressing is characterized by low strength and zero frost resistance. Considered effective additives to scrap, increasing its contact strength. Active micro- and nano-silica increase it by 1,5 times, low-base calcium aluminates in the form of alumina cement and high-alumina slag – 2,5–3 times. Compositions from concrete scrap of the 0–5 mm fraction and high-alumina slag as road foundations providing the required strength and frost resistance were investigated. The high characteristics of pressed stone from scrap and low-base aluminates are explained by the rapid transformation of hexagonal hydroaluminates to cubic C_3AH_6 during pressing with the formation of a large amount of $Al(OH)_3$ contact active gel.

Key words: road base, concrete scrap, cement phase C-S-H, contact strength, additives, portlandite, high-alumina slag, hydration.

REFERENCES

1. Gusev B.V., Zagurskiy V.A. Vtorichnoe ispol'zovanie betonov [Recycled concrete]. Moscow, 1988. 96 p. (in Russian)
2. Bravo M., De Brito J., Pontes J., Evangelista L. Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*. 2015. No. 77. Pp. 357–369.
3. Ledesma E.F., Jimenez J.R., Ayuso J., Fernandez J.M., De-Brito J. Maximum feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production Part-I: ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production*. 2015. No. 87. Pp. 692–706.
4. Özalp F., Yılmaz H.D., Kara M., Kaya O., Şahin A. Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*. 2016. No. 110. Pp. 17–23.

5. Ossa A., García J.L., Botero E. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. *Journal of Cleaner Production*. 2016. No. 135. Pp. 379–386.
6. Rahal K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Build. Environ.* 2007. No. 1. Pp. 407–415.
7. Yang K.H., Chung H.S., Ashour A. Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Mater. J.* 2008. No. 3. Pp. 289–296.
8. Evangelista L., Brito J. Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregate. *Cem. Concr. Compos.* 2007. No. 5. Pp. 397–401.
9. López-Gayarre F., Serna P., Domingo-Cabo A., Serrano-López M.A., López-Colina C. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Manag.* 2009. No. 12. Pp. 3022–3028.
10. Glukhovskiy V.D., Runova R.F., Maksunov S.E. Vyazhushchie i kompozitsionnye materialy kontaktного tverdeniya [Binding and composite materials of contact hardening]. Kiev, 1991. 242 p. (in Russian)
11. Runova R.F., Maksunov S.E. Perspektivy ispol'zovaniya vyazhushchikh kontaktno-kondensatsionного tverdeniya v kompozitsionnykh materialakh [Prospects for the use of contact-condensation hardening binders in composite materials]. *Tsement [Cement]*. 1990. No. 6. Pp. 54–56. (in Russian)
12. Soroka I., Sereda P.J. The structure of cement-stone. *Proceedings of the Fifth International symposium of the chemistry of cement*. Tokio, 1968. P. 3. Vol. 3. Pp. 67–73.
13. Ovcharenko G.I., Ibe E.E., Sadrasheva A.O., Viktorov A.V. Kontaktnaya prochnost' tsementnoy fazy C-S-H s dobavkami [Contact strength of phase C-S-H cement with additives]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]*. 2018. No. 8. Pp. 48–57. (in Russian)