

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 691.335

Применение дробленого бетона и битого стекла при вторичном производстве бетона

А.В. Щербань

Каменский технологический институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, г. Каменск-Шахтинский, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается проблема использования отходов, образующихся при сносе зданий и сооружений, например, разрушенных обломков бетона и битого стекла, которые перерабатываются и повторно могут применяться в качестве заполнителей для бетона. Автором предпринята попытка полностью заменить крупный заполнитель бетона дробленным бетоном и дробленным стеклом в качестве частичной замены мелкого заполнителя с содержанием 20, 25 и 30 % соответственно. Основные результаты этого исследования показали, что использование в качестве мелкого заполнителя стекла вместо песка при 30-процентной замене обеспечивает максимальную прочность на сжатие, которая значительно превышает прочность бетона марки М35 (35 МПа) и приближается к прочности бетона марки М40 (40 МПа) до М45 (45 МПа), что указывает на пригодность использования его в различных конструкциях. Также было установлено, что с увеличением количества стекла в бетоне соответствующее увеличение прочности не происходит линейно, но скорость увеличения прочности постепенно замедляется с увеличением количества стекла в образцах бетона.

Ключевые слова: разрушенные обломки бетона, дробленое стекло, песок, мелкий и крупный заполнители, прочность бетона

Use of Crushed Concrete and Broken Glass in Secondary Concrete Production

Aleksey V. Shcherban

Kamensk Technological Institute (branch) of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Kamensk-Shakhtinskiy, Russian Federation

Abstract. The problem of using waste generated during the demolition of buildings and structures, for example, destroyed fragments of concrete and broken glass, which are recycled and can be reused as aggregates for concrete, is considered. The author has made an attempt to completely replace a large aggregate of concrete with crushed concrete and crushed glass as a partial replacement for a fine aggregate with a content of 20, 25 and 30%, respectively. The main results of this study showed that the use of glass as a fine filler instead of sand with a 30% replacement provided maximum compressive strength, which significantly exceeded the strength of concrete grade M35 (35 MPa) and approached the strength of concrete grade M40 (40 MPa) to M45 (45 MPa), which indicated the suitability of use in various designs. It was also found that with an increase in the amount of glass in concrete, the corresponding increase in strength did not occur linearly, but the rate of increase in strength gradually slowed down with an increase in the amount of glass in concrete samples.

Keywords: broken concrete debris, crushed glass, sand, fine and coarse aggregates, concrete strength

Введение. С увеличением объема строительства различных бетонных конструкций увеличивается и количество отходов от сноса старых зданий и сооружений. К таким отходам относятся бетон, стекло, металл и другие материалы. Некоторые исследователи считают, что бетонные и стеклянные отходы могут быть использованы в качестве альтернативного сырья для различных видов строительных материалов [1]. В данной работе рассматривается целесообразность использования такого альтернативного источника сырья для бетонных конструкций.

Использование переработанного бетона в качестве заполнителя помогает решить проблемы, связанные с добычей природных заполнителей и утилизацией старого бетона [2]. Имеется ряд исследований, авторы которых рассматривают влияние заменителей на свойства бетона. Например, Алекс Уилсон изучал влияние неровной поверхности дробленого бетона на свойства смесей. В ряде научных работ рассматривалось

использование пластиковых материалов и стекла в гражданском строительстве. Основная цель таких исследований заключалась в изучении возможности использования пластмасс и стеклянного порошка в различных проектах [3–4]. Экологические стеклянные отходы уже применяются при строительстве дорог, производстве асфальта и бетона [3]. Ахмад Шаян исследовал использование стеклянных отходов в качестве заполнителей для производства бетона [5]. Использование вторичных заполнителей позволяет экономить природные ресурсы и уменьшать количество отходов, а также способствует сохранению чистоты окружающей среды. В данном исследовании основное внимание уделяется стеклянным строительным отходам, которые используются как заменитель при производстве бетона. В рамках исследования будут рассмотрены следующие вопросы: целесообразность использования разрушенного бетона в качестве полной замены крупного заполнителя, а также применение стекла для частичной замены песка в качестве мелкого заполнителя.

Основная часть. Материалы и методы. В данном исследовании использовались такие материалы, как цемент, песок, крупный заполнитель и дробленое стекло. Процесс замачивания и твердения был осуществлен с применением обычной воды.

Для достижения поставленной цели исследования была разработана обширная и комплексная экспериментальная программа, которая была разделена на несколько этапов. На первом этапе были изучены физические и материальные свойства песка, дробленого стекла, цемента и заполнителя из разрушенного бетона. Все полученные результаты были задокументированы. На втором этапе отливались формы для исследования. На третьем этапе (в течение 7 и 28 суток) происходило твердение формы для нескольких комплектов цилиндрических образцов бетона. На заключительном этапе было проведено испытание форм на универсальной испытательной пресс-машине [6].

Экспериментальные исследования. Для приготовления бетонной смеси были определены следующие пропорции: цемент, мелкий заполнитель и крупный заполнитель в соотношении 1:1,5:3 соответственно. Водоцементное отношение (В/Ц) установлено на уровне 1:4. Девять цилиндрических форм диаметром 3 и высотой 6 дюймов были использованы для изготовления и выдержки стеклянного порошка в течение 28 дней. Каждая форма содержала одинаковое количество порошка.

Подготовка образцов. Изначально стеклянные отходы были дроблены с помощью молотка до получения порошка мельче 0,85 мм. Песок, стекло и крупные заполнители проходили ситовую очистку в соответствии с требованиями. Для создания бетона все компоненты (цемент, песок, стеклянный порошок и крупные заполнители) взвешивались в соответствии с заданными пропорциями. В каждой конкретной смеси бетона замена мелкого заполнителя стеклом составляла от 20 до 30 %. Регенерированные заполнители получали путем измельчения отработанных бетонных кубов и цилиндров, использованных и выброшенных в результате предыдущих лабораторных испытаний [7]. Затем дробленный бетон был просеян методом ситового анализа. Количество используемых мелких частиц измерялось для каждого образца.

Градационная кривая частиц стекла, представленная на рис. 1, является определяющим инструментом для изменения размера стеклянных частиц в составе бетонной смеси.

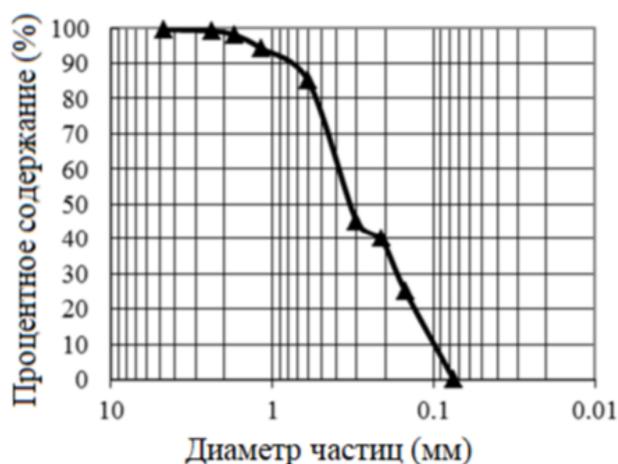


Рис.1. Градационная кривая стекла

Процентное содержание песка, стекла и крупного заполнителя, используемых в образцах бетона приведены в таблице 1. Заполнитель придает бетону структуру. Это позволяет ему формировать прочную жесткую однородную структуру.

Таблица 1

Соотношение крупного и мелкого заполнителей в бетонной смеси

№ образца	9,51 мм (10 % от общего количества), кг	12,7 мм (35 % от общего объема), кг	19 мм (55 % от общего количества), кг
1	0,16	0,49	0,75
2	0,16	0,49	0,75
3	0,16	0,49	0,75

В таблице 2 показано изменение размеров заполнителя и их содержания в каждом образце бетона. Варьирование размеров крупного и мелкого заполнителей позволяет устранить пустоты в бетонных образцах.

Таблица 2

Полная замена заполнителя (1,3 кг) на образец

Содержание стекла, %	Песок, кг	Стекло, кг	Крупный заполнитель, кг
20	0,59	0,25	1,4
25	0,57	0,32	1,4
30	0,53	0,37	1,4

В таблице 3 показаны общее количество стекла, цемента, заполнителя, песка и воды на один образец, а также тип просеивания, используемый для получения необходимых материалов для испытания. Данные из таблицы 3 дают представление об оптимальном количестве материала для каждой бетонной смеси. На практике содержание воды может быть несколько изменено для повышения обрабатываемости и улучшения однородности смеси, что способствует повышению прочности бетонных образцов [8].

Таблица 3

Количество использованных материалов на образец

№	Цемент, кг	Песок, кг			Стекло, кг			Заполнитель, кг			Вода, л
		0,6 мм	0,3 мм	0,15 мм	0,6 мм	0,3 мм	0,15 мм	19 мм	12,7 мм	9,51 мм	0,4x0,4
1	0,42	0,1996	0,286	0,08	0,068	0,1036	0,0576	0,73	0,48	0,14	0,165
2	0,42	0,1996	0,286	0,08	0,068	0,1036	0,0576	0,74	0,48	0,14	0,165
3	0,42	0,1926	0,276	0,0826	0,086	0,1306	0,0726	0,74	0,48	0,14	0,165
4	0,42	0,1926	0,276	0,0826	0,086	0,1306	0,0726	0,74	0,48	0,14	0,165
5	0,42	0,1786	0,256	0,0766	0,104	0,1576	0,0876	0,74	0,48	0,14	0,165
6	0,42	0,1786	0,256	0,0766	0,104	0,1576	0,0876	0,74	0,48	0,14	0,165
Итого	2,47	1,42	1,64	0,499	0,523	0,784	0,436	4,39	2,78	0,79	0,985

Испытания на сжатие цилиндрических образцов проводились на универсальной испытательной пресс-машине мощностью 3000 кН. Цилиндры взвешивались, нагрузка прикладывалась без каких-либо ударов. Для каждой смеси предусмотрен набор, состоящий из трех бетонных цилиндров, используемых для определения прочности на сжатие после 28-суточного процесса твердения. Предельная нагрузка, при которой произошло разрушение образца, была записана для каждого образца. Отношение разрушающей нагрузки к площади поверхности цилиндров определяет предел прочности бетонного цилиндра.

По данным таблиц 4 и 5 видно, что прочность на сжатие бетонных смесей заметно возрастает по мере увеличения времени их твердения. Это указывает на улучшение несущей способности с увеличением продолжительности времени твердения.

Таблица 4

Прочность на сжатие образцов на 7 сутки твердения

Содержание стекла	№ образца	Нагрузка при разрушении, кН	Крупный заполнитель, кг	Предел прочности на сжатие, МПа
20%	1	106,2	24,15	20%
25%	2	115,3	26,21	25%
30%	3	125,5	28,65	30%

Таблица 5

Прочность на сжатие образцов на 28 сутки твердения

Содержание стекла	№ образца	Нагрузка при разрушении, кН	Предел прочности на сжатие, МПа	Среднее значение
	1	158,8	36,25	
20%	2	156,6	35,31	36,23
	3	163,4	36,61	
	4	173,3	38,98	
25%	5	167,2	37,64	38,90
	6	179,3	40,09	
	7	178,1	40,48	
30%	8	182,5	41,01	40,18
	9	183,5	41,46	

На графике рис. 2 показано изменение прочности на сжатие для 7-дневного затвердевания. Видно, что чем выше процентное содержание стеклянного порошка в бетоне, тем выше прочность на сжатие. График зависимости нагрузки от времени, полученный при испытании на сжатие для 7-дневного затвердевания, показан на рис. 3. Эти графики демонстрируют предельную прочность цилиндрических образцов на сжатие.

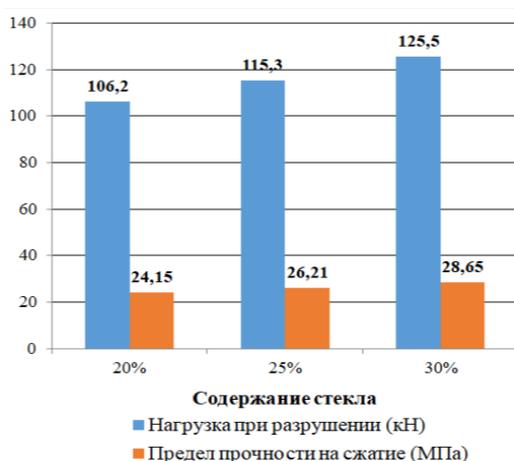


Рис. 2. Предельная прочность на сжатие при 7-дневном затвердевании



Рис. 3. Кривая зависимости нагрузки от времени, полученная на универсальной испытательной машине (7-дневное затвердевание)

На рис. 4 показано изменение предельной прочности на сжатие образцов бетона, содержащих 20 % стеклянных частиц. В рис. 5 демонстрируется наивысшая нагрузка, достигаемая при разрушении образца, который состоит из смеси песка с 25 % стеклянных частиц. Рис. 6, в свою очередь, иллюстрирует максимальную нагрузку при разрушении образца, содержащего 30 % стеклянных частиц в смеси с песком. На рис. 7 представлена зависимость нагрузки от времени, полученной с применением пресс-машины. В ходе данного эксперимента образец затвердевал в течение 28 дней. Предел разрушения определяется на основе момента, когда кривая становится нисходящей, а не восходящей [9, 10].

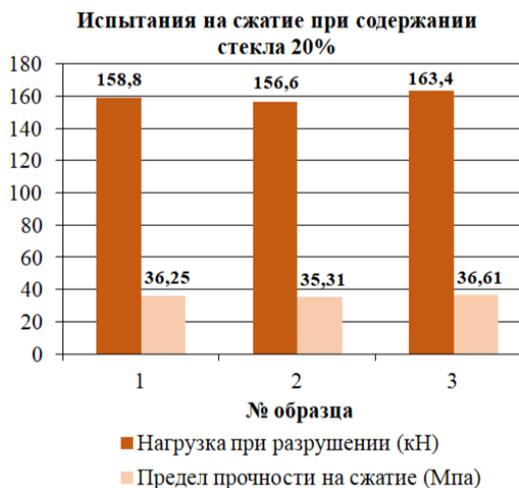


Рис. 4. Предельная прочность на сжатие при 28-дневном затвердевании (20 % стекла)

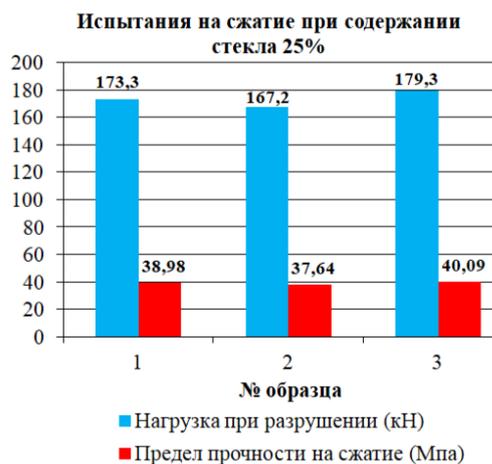


Рис. 5. Предельная прочность на сжатие при 28-дневном затвердевании (25 % стекла)

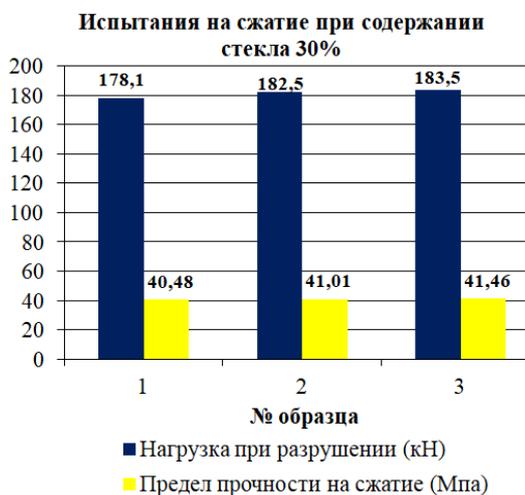


Рис. 6. Предельная прочность на сжатие при 28-дневном затвердевании

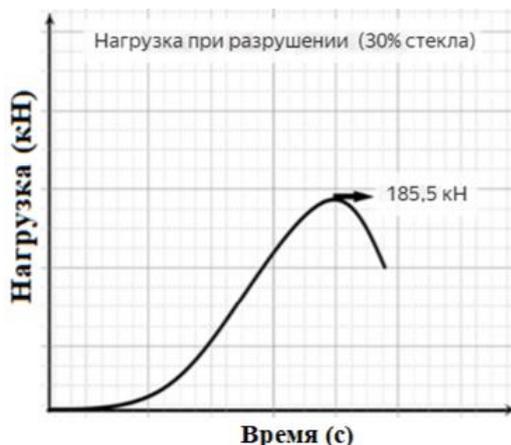


Рис. 7. Кривая зависимости нагрузки от времени, полученная на компрессионной машине (28-дневное затвердевание)

График на рис. 8 показывает, как изменяется предельная прочность бетона на сжатие при нарастающем процентном содержании стекла в качестве мелкого заполнителя после 7-дневного твердения. Анализируя график, можно заметить, что предельная прочность бетона на сжатие стабильно растет с увеличением процентного содержания стекла. Прочность обусловлена добавлением стекла, в большей степени она проявляется в образцах с 28-суточным сроком твердения (рис. 9).

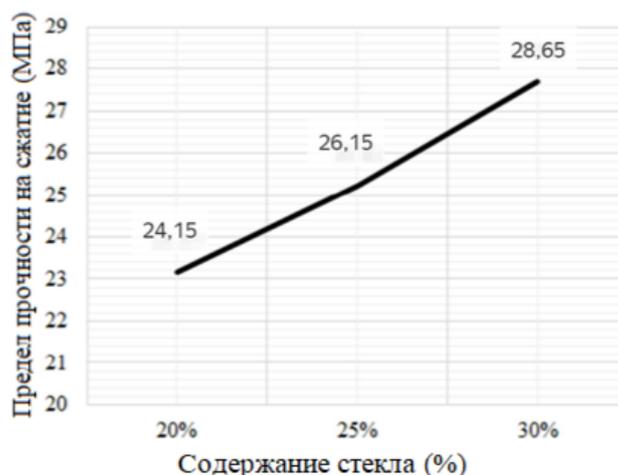


Рис. 8. Изменение предела прочности на сжатие в зависимости от процентного содержания стекла для 7-дневного затвердевания

График на рис. 9 показывает изменение предельной плотности мелкого заполнителя для 28-дневного твердения: по мере увеличения процентного содержания стекла в бетонной смеси значительно возрастает предел прочности на сжатие данного материала. Кроме того, заметно, что скорость увеличения прочности на сжатие также увеличивается больше при содержании стекла с 20 до 25 %, чем при содержании стекла от 25 до 30 %. Создается впечатление, что скорость набора прочности при сжатии начинается после 25-процентной замены песка стеклом.

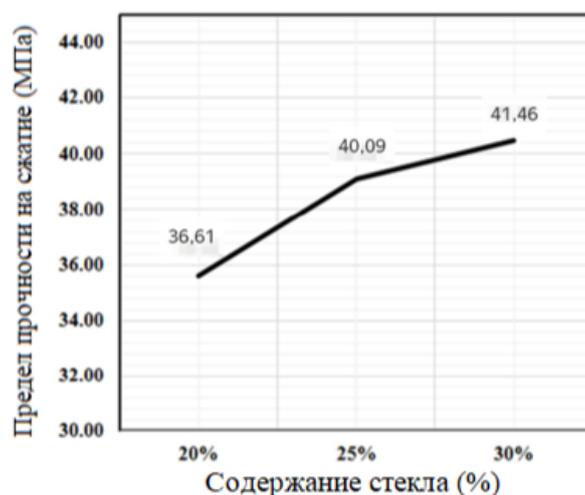


Рис. 9. Изменение предела прочности на сжатие в зависимости от процентного содержания стекла для 28-дневного затвердевания.

Заключение. На основании результатов испытаний и наблюдений можно сделать следующий вывод: увеличение количества дробленого стекла в бетонной смеси приводит к повышению прочности бетона при сжатии. Прочностные показатели превышают значения для бетона марки М35 (35 МПа) и достигают близких к уровню М40 (35 МПа) при замещении песка стеклом на 30 %. Однако после достижения содержания стекла на уровне 25 % рост прочности при сжатии начинает замедляться. Эксперимент с использованием в качестве мелкого заполнителя стекла был проведен с целью выяснения преимуществ и недостатков применения различных отходов, полученных при сносе зданий и сооружений. Его результаты свидетельствуют о возможности повторного использования строительных отходов при новом строительстве.

Список литературы

1. Аксёнова Л.Л., Бугаенко Л.В., Хлебенских С.Н. *Переработка и утилизация строительных отходов для получения эффективных зеленых композитов*. В: Материалы III междунар. науч. конф. «Современные тенденции технических наук». Казань; 2014. С. 63–65.
2. Щербань А.В. Исследование процесса частичной замены песка заполнителем из стекла и резины при производстве бетона. *Молодой исследователь Дона*. 2023;2(41):78–83.

3. Ablam Zidol, Monique Tognonvi, A. Tagnit-Hamou. Effect of glass powder on concrete sustainability. *New Journal of Glass and Ceramics*. 2017;07(02):34–47. <https://doi.org/10.4236/njgc.2017.72004>
4. Chanbane B., Sholar G.A., Musselman J.A., Page G.C. Ten-year performance evaluation of asphalt–rubber surface mixes. *Transportation Research Record*. 1999;1681(1):10–18. <https://doi.org/10.3141/1681-02>
5. Ahmad Shayan. Value-added utilization of waste glass in concrete. In *IABSE Symposium: Towards a Better Built Environment — Innovation, Sustainability, Information Technology*. Melbourne, Australia; 2002. P. 12-21. <https://doi.org/10.2749/222137802796337099>
6. Ефименко А.З. Бетонные отходы — сырье для производства эффективных строительных материалов. *Технологии бетонов*. 2014;2(91):17–21.
7. Коровкин М.О., Шестернин А.И., Ерошкина Н.А. Использование дробленого бетонного лома в качестве заполнителя для самоуплотняющегося бетона. *Инженерный вестник Дона*. 2015;3(37):85.
8. Курочка П.Н., Мирзалиев Р.Р. Бетоны с заполнителем из продуктов дробления вторичного бетона. *Вестник РГУПС*. 2012;3(47):140–147.
9. Головин Н.Г., Алимов Л.Н., Воронин В.В. и др. *Повторное использование — одно из направлений решения экологической проблемы при производстве изделий и конструкций из бетона*. В: Труды II Всерос. (Международной) конф. по бетону и железобетону «Бетон и железобетон — пути развития». В 5 книгах. Москва: ООО «Информполиграф»; 2005. С. 194–203.
10. Воронин В.В., Алимов Л.Н., Балакшин А.С. Малощебеночные бетоны на щебне из бетонного лома. *Технология бетонов*. 2010;3–4(44–45):28–30.

Об авторе:

Щербань Алексей Вадимович, ассистент кафедры естественно-научных дисциплин, информационных технологий и управления Каменского технологического института (филиала) ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова (347801, РФ, г. Каменск-Шахтинский, ул. Сапрыгина, 6), scherban.aleksei@yandex.ru

About the Author:

Aleksey V. Shcherban, Assistant of the of Natural Sciences, Information Technology and Management Department, Kamensk Technological Institute (branch) of Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) (6, Saprygina Str., Kamensk-Shakhtinsky, 347800, RF), scherban.aleksei@yandex.ru