

УДК 504.05

**К ВОПРОСУ ПРИМЕНЕНИЯ ВТОРИЧНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
В КАЧЕСТВЕ ЭФФЕКТИВНОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА****В.И. Трофимов, М.А. Смирнов***Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Трофимов В.И., Смирнов М.А., 2025

Аннотация. Представлен анализ выполненных различными авторами исследований в области применимости минерального вторичного сырья в строительстве. Рассмотрен вопрос повышения эффективности его использования для изготовления эффективных строительных бетонных изделий. Предложена методика улучшения зернового состава заполнителя из дробленого боя силикатного кирпича путем его обогащения качественным щебнем из прочных горных пород.

Ключевые слова: заполнители бетона, кирпичный бой, обогащение, зерновой состав, прочность.

DOI: 10.46573/2658-7459-2025-2-28-35

В настоящее время отходы промышленного производства и вторичное сырье находят все более широкое применение при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций [1–4]. Этому способствуют различные программы по сносу устаревших зданий и сооружений. Например, программа «Реновация» уже несколько лет успешно реализуется в г. Москве (рис. 1). Кроме того, в районах проведения специальной военной операции ощущается острая необходимость в работах по восстановлению тех или иных зданий. При этом известно, что от разрушенных построек образуется большое количество техногенного сырья в виде кирпичного боя и бетонного лома, которое может быть с успехом использовано в производстве эффективных строительных материалов [2]. Данный подход позволит снизить дефицит таких материалов, расширить их сырьевую базу и повысить экологическую безопасность. Следовательно, выпуск бетонных изделий различного назначения на основе переработанного вторичного минерального сырья является актуальной задачей.



Рис. 1. Снос старых зданий: а – из железобетонных панелей; б – кирпича

Ежегодное образование отходов от сноса зданий и сооружений в нашей стране составляет более 17 млн т, 40 % из которых – кирпичный бой [5]. Вопросами эффективного использования продуктов дробления кирпичного боя и бетонного лома занимались Баженов Ю.М., Чумаков Л.Д., Лесовик В.С., Пистилла М.Ф. и другие отечественные и зарубежные ученые. Однако до сих пор не нашли широкого распространения материалы и изделия из бетона на основе вторичного минерального сырья, несмотря на имеющийся положительный опыт применения. При этом остается нерешенным ряд вопросов по повышению прочности и других эксплуатационных свойств изделий на основе таких бетонов.

Из большого перечня вторичного минерального сырья бетонный лом и кирпичный бой являются в настоящее время все более востребованными в производстве эффективных строительных материалов и изделий (рис. 2).



Рис. 2. Вторичное минеральное сырье:

а – бой керамического кирпича;

б – бетонный лом

Известны исследования в области обоснования применимости силикатного и керамического боя в качестве эффективных заполнителей для легкого и тяжелого бетонов [5]. Выполненные на сегодняшний день научно-исследовательские работы показывают, что результаты применения бетонного и кирпичного лома не всегда однозначны [1]. В первую очередь это связано с различными сроками и условиями эксплуатации строительных конструкций до того момента, как они стали отходами. При этом не учитываются марки сырья (например, силикатного кирпича), а также толщина слоев различных растворов: кладочного и штукатурного и др.

В то же время существует проблема, связанная с малой степенью изученности работы заполнителей, полученных из минерального вторичного сырья, в различных условиях эксплуатации, а также с отсутствием достаточного отечественного опыта технологической переработки строительных отходов. Организация производства эффективных бетонных изделий на базе вторичного сырья требует обоснованного выбора технологий и формовочного оборудования необходимой производительности.

На сегодняшний день исследуются технологии разделения бетонного лома на исходный заполнитель и цементный камень, что позволит осуществлять переработку и повторное применение этого материала более эффективно [6].

Результаты испытаний образцов бетона на основе щебня из боя силикатного кирпича, керамического кирпича и бетонного боя показали, что расчетная плотность (а соответственно, прочность) меньше фактической: у бетона на основе щебня из силикатного кирпича – на 2,91 %; керамического кирпича – на 5,17 %; бетонного боя – на 3,82 %. Заданного значения прочности бетона В30 достиг только бетон на основе щебня из силикатного кирпича, что было объяснено влиянием активаторов твердения цемента – гидросиликатов кальция, являющихся компонентами силикатного кирпича [1]. Снижение плотности было объяснено влиянием образующейся поверхностной пористости дробленого материала [7].

Для проведения исследований использовался рециклинговый щебень из боя силикатного кирпича (без раствора) и из боя кладки с силикатным кирпичом (вместе с раствором) [8]. По результатам проведенной работы выявлено, что рециклинговый щебень, полученный дроблением фрагментов кирпичной кладки из силикатного кирпича (с раствором), и рециклинговый щебень, полученный дроблением силикатного кирпича (без раствора), пригодны (наравне со щебнем из осадочных и метаморфических пород) для применения в качестве крупного заполнителя при производстве бетонов общестроительного назначения.

Тем не менее остаются недостаточно изученными вопросы влияния на прочность бетона толщины слоя раствора, остающегося на зернах кирпичного боя; объема содержания пылеватых частиц кирпичного боя; соотношения двух и более видов фракций (основной и вспомогательной) с учетом марок по прочности. При этом важным вопросом, рассматриваемым с позиций эксплуатационных свойств и экономической эффективности полученного бетона на основе кирпичного боя, является обоснование его процентного содержания в общем объеме.

Одним из способов повышения эффективности использования боя из силикатного кирпича в качестве крупного заполнителя бетона является его обогащение. В случае мелкого заполнителя обогащение широко используется при отсутствии значительных запасов кондиционных песков. Так, в Краснодарском крае широко распространены мелкие и пылеватые пески, существенно ухудшающие качество бетона. Одним из путей повышения эффективности их использования является обогащение качественными песками [9].

Метод обогащения крупного заполнителя низкого качества до последнего времени широкого распространения не получил. Однако в последнее время наметилась тенденция использования бетонного лома, кирпичного и стеклянного боя, а также других материалов вторичного минерального сырья для изготовления эффективных строительных бетонных изделий различного назначения.

Известно, что зерна заполнителя различного происхождения и крупности и их соотношения в матрице бетона влияют на его конечную плотность и прочность [9]. На рис. 3 представлены схемы идеализированных структур бетона, формирующихся в зависимости от крупности фракций обогащенного известняковым щебнем заполнителя на основе силикатного кирпичного боя.

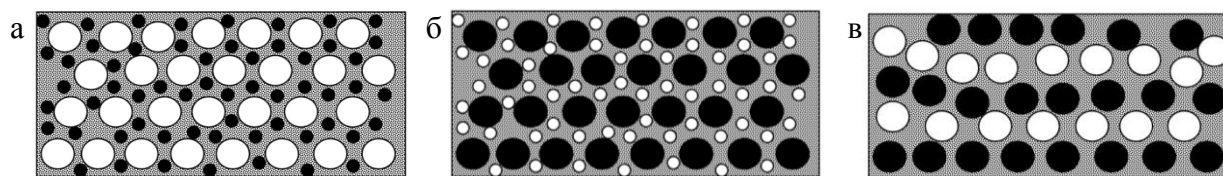


Рис. 3. Идеализированные модели формируемых структур бетона для случаев:
а – крупность зерен известнякового щебня (гравия) меньше крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} < d_{щ_{кшр}}$; б – крупность зерен известнякового щебня (гравия) больше крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} > d_{щ_{кшр}}$; в – крупность зерен известнякового щебня (гравия) равна крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} \approx d_{щ_{кшр}}$;

○ – щебень из боя силикатного кирпича; ● – известняковый щебень (гравий);
■ – цементно-песчаная матрица

Схемы развития возможных напряжений (σ) для случаев использования зерен заполнителя различной крупности в матрице бетона с условием, что прочность зерен кирпичного боя меньше прочности зерен известнякового щебня ($R_{щ_{кшр}} < R_{щ_{из}}$), представлены на рис. 4.

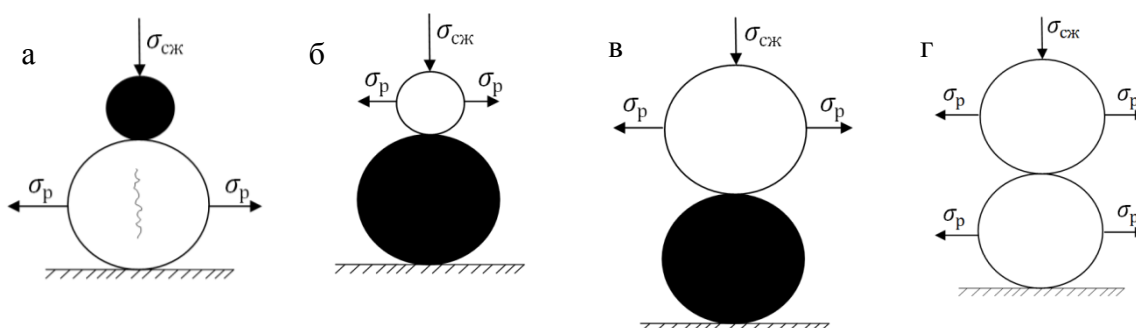


Рис. 4. Схемы возможного силового взаимодействия зерен заполнителя различного происхождения и крупности для случаев: а – крупность зерен известнякового щебня (гравия) меньше крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} < d_{щ_{кшр}}$; б – крупность зерен известнякового щебня (гравия) больше крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} > d_{щ_{кшр}}$; в – крупность зерен известнякового щебня (гравия) равна крупности щебня из силикатного кирпичного боя, $d_{щ_{из}} \approx d_{щ_{кшр}}$;

г – одинаковый диаметр зерен силикатного кирпичного боя;
○ – щебень из боя силикатного кирпича; ● – известняковый щебень (гравий)

Так как дробимость щебня из боя силикатного кирпича меньше дробимости известнякового щебня ($Dp_{щ_{кп}} < Dp_{щ_{из}}$), необходимо установить с точки зрения прочности и эффективности технологии бетона, какой вид щебня задавать более крупным: кирпичный или известняковый. При этом может быть реализовано три варианта.

В первом варианте, когда $d_{щ_{из}} < d_{щ_{кп}}$, прочность бетона базируется в основном на усиленной матрице, упрочненной мелким известняковым щебнем. Благодаря технологии получения щебня из боя силикатного кирпича дроблением до заданной крупности (фракции) будет оставаться меньше отходов в виде пыли и мелкой крошки, что повышает эффективность производства.

Во втором варианте, когда $d_{щ_{из}} > d_{щ_{кп}}$, прочность бетона определяется в основном взаимодействием зерен прочного известнякового щебня с ослабленной матрицей. При подготовке (дроблении боя силикатного кирпича) будет образовываться повышенный объем отходов в виде пыли и мелкой крошки, что снижает эффективность производства бетонных изделий.

В третьем варианте, когда $d_{щ_{из}} \approx d_{щ_{кп}}$, пустотность между зернами двух видов щебня достигает максимального значения, а прочность бетона определяется в основном прочностью цемента-песчаной матрицы, что менее эффективно с точки зрения производства бетонных изделий.

Известно, что на прочность сформированной структуры влияет контактный фактор – силовое взаимодействие между зернами двух видов щебня (например, в технологических процессах приготовления смеси, нагружения бетонного изделия или при испытании на дробимость обогащенной смеси) (рис. 4).

Наиболее сложный случай взаимодействия между зернами заполнителей двух видов будет возникать при работе единичного зерна щебня из кирпичного боя в объемно-напряженном состоянии в случае всестороннего воздействия на него зерен известнякового щебня (рис. 5б).

С учетом того, что прочность зерен щебня из кирпичного боя меньше прочности зерен известнякового щебня ($R_{щ_{кп}} < R_{щ_{из}}$), деформируемость будет также связана через модули деформации $E_{щ_{кп}} < E_{щ_{из}}$. В этом случае можно принять модель объемно-напряженного состояния, при которой $\sigma_1 \gg \sigma_2 = \sigma_3$ (рис. 5а). Существует связь между нормальным вертикальным давлением (напряжением σ_1) и боковым давлением (напряжением $\sigma_2 = \sigma_3$) в виде $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_1 \xi$, где ξ – коэффициент бокового давления, который может быть принят для сыпучих, несвязанных систем (сухая смесь заполнителей бетона) – 0,43; для связанных систем (глина, готовая бетонная смесь) – 0,73 [10].

Используя известные соотношения напряженного состояния и вида приложенной нагрузки, можно ориентировочно прогнозировать предельное состояние и применять его в технологических расчетах (например, при приготовлении обогащенной смеси, испытании на прочность бетонного изделия или при испытании на дробимость обогащенной смеси из заполнителей различного вида).

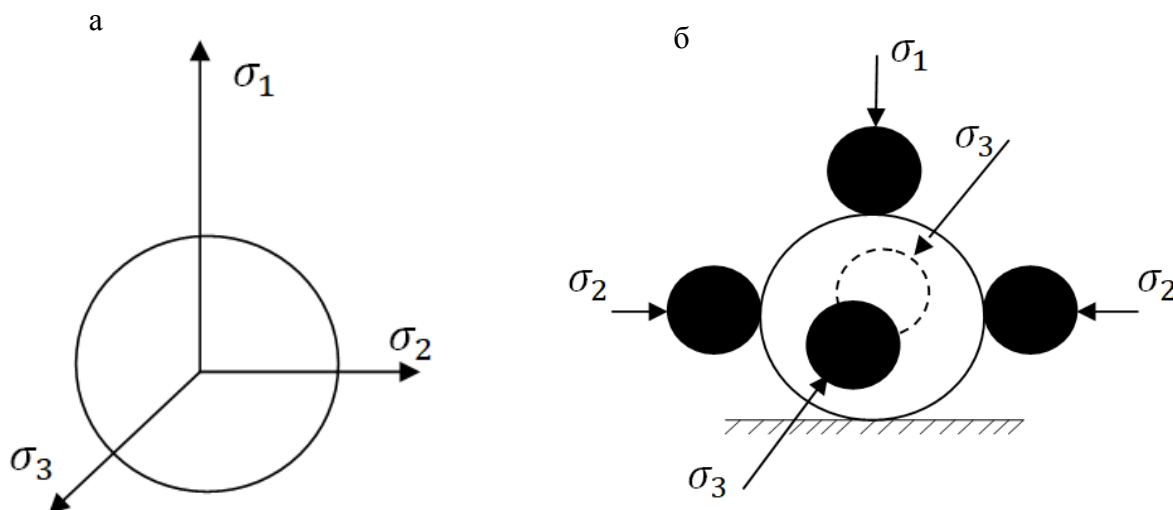


Рис. 5. Схемы работы единичного зерна щебня из кирпичного боя в объемно-напряженном состоянии: а – схема действия напряжений в объемно-напряженном состоянии; б – в случае всестороннего воздействия зерен известнякового щебня при $\sigma_1 \gg \sigma_2 = \sigma_3$

Таким образом, на основе всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Анализ существующих работ, посвященных использованию вторичного минерального сырья в производстве бетонных изделий, показал возможность повторного применения исследуемых материалов в строительстве в качестве эффективного заполнителя бетона.

2. В связи с актуальностью решения проблемы широкого использования вторичного минерального сырья (в частности, щебня из кирпичного силикатного боя) в производстве эффективных бетонных изделий с улучшенными эксплуатационными свойствами была предложена концепция увязки свойств цемента с двухкомпонентной системой крупного заполнителя.

3. Одним из путей улучшения эксплуатационных свойств тяжелого бетона может быть применение технологии обогащения некондиционного щебня, получаемого из боя силикатного кирпича, путем включения в его состав гранитного щебня для улучшения структуры самой бетонной матрицы, но без снижения при этом ее структурной прочности.

4. Более высокая степень уплотнения/прочности в случае применения в составе бетона силикатного кирпичного боя может быть достигнута при использовании двух видов щебня, причем силикатная кирпичная фракция задается более крупной, чем гранитная.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Украинский И.С., Майорова Л.П., Саликов Д.А., Шевчук А.С., Чайников Г.А. Повторное использование бетонного и кирпичного лома в качестве заполнителей в бетон // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2023. Т. 31. № 2. С. 291–301.
2. Ахмед А.А.А. Эффективные композиты с использованием отсеков дробления фрагментов разрушенных зданий и сооружений: дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2021. 208 с.
3. Романенко И.И. Применение лома глиняного кирпича в качестве крупного заполнителя бетонов // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2022/8051 (дата обращения: 18.02.2025).
4. Иванова Т.А., Колесникова Л.Г. Оценка эффективности применения бетонного лома в качестве крупного заполнителя для бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7530 (дата обращения: 18.02.2025).
5. Хаджиев М.Р. Керамобетон на основе вторичных заполнителей из кирпичного боя для мелкоштучных стеновых изделий: дис. ... канд. техн. наук. Грозный, 2015. 222 с.
6. Чайников Г.А., Каменчуков Ю.В., Дерюгина И.А. Рециклирование бетона в целях его повторного использования в асфальтобетоне // *Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного и дорожно-транспортного комплекса: Материалы национальной научно-практической конференции / отв. ред. П.И. Егоров*. Хабаровск: ТОГУ, 2022. Вып. 22. С. 107–111.
7. Farid Debieb, Kenai S. The Use of Coarse and Fine Crushed Bricks as Aggregate in Concrete // *Construction and Building Materials*. 2008. No. 22. P. 886–893.
8. Беппаев З.У., Аствацатурова Л.Х., Колодяжный С.А., Вернигора С.А., Лопатинский В.В. Определение нормируемых характеристик рециклингового щебня из боя силикатного кирпича и перспективы его применения // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2022. Т. 33. № (2). С. 63–73.
9. Баженов Ю.М. Технология бетона: учебник. М.: АСВ, 2003. 500 с.
10. Дашко Р.А., Каган А.А. Механика грунтов в инженерно-геологической практике. М.: Недра, 1977. 237 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТРОФИМОВ Валерий Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: vetrofa@mail.ru

СМИРНОВ Матвей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

Трофимов В.И., Смирнов М.А. К вопросу применения вторичного минерального сырья в качестве эффективного заполнителя тяжелого бетона // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии». 2025. № 2 (26). С. 28–35.

**ON THE USE OF SECONDARY MINERAL RAW MATERIALS
AS AN EFFECTIVE FILLER FOR HEAVY CONCRETE**

V.I. Trofimov, M.A. Smirnov
Tver State Technical University (Tver)

Abstract. This article presents an analysis of research conducted by various authors on the applicability of secondary mineral raw materials in construction. The issue of increasing the efficiency of their use in the production of effective concrete building products is discussed. A method for improving the grain size distribution of aggregate made from crushed sand-lime brick by enriching it with high-quality crushed rock from strong rocks is proposed.

Keywords: concrete aggregates, brick chips, enrichment, grain composition, strength.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: vitrofa@mail.ru

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

CITATION FOR AN ARTICLE

Trofimov V.I., Smirnov M.A. On the use of secondary mineral raw materials as an effective filler for heavy concrete // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2025. No. 2 (26), pp. 28–35.