

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2022, Том 9, № 4 / 2022, Vol 9, No 4 <https://resources.today/issue-4-2022.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/20ECOR422.pdf>

DOI: 10.15862/20ECOR422 (<https://doi.org/10.15862/20ECOR422>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Нажуев, М. П. Анализ видов технологий по переработке строительных материалов по показателям углеродного следа / М. П. Нажуев, А. У.-Б. Пошев, У. И. Исаева, А. А. Харитонов, М. Н. Ахмедов // Отходы и ресурсы. — 2022. — Т. 9. — № 4. — URL: <https://resources.today/PDF/20ECOR422.pdf> DOI: 10.15862/20ECOR422

For citation:

Nazhueva M.P., Poshev A.U.-B., Isaeva U.I., Kharitonov A.A., Akhmedov M.N. Analysis of types of technologies for the processing of building materials by carbon footprint indicators. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2022; 9(4): 20ECOR422. Available at: <https://resources.today/PDF/20ECOR422.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/20ECOR422

УДК 691.32

Нажуев Мухума Пахрудинович

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Махачкала, Россия

Аспирант

E-mail: nazhueva17@mail.ru

Пошев Азраиль Умар-Бекович

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Аспирант

E-mail: azrail.poshev@mail.ru

Исаева Улана Исаковна

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Махачкала, Россия

Аспирант

E-mail: dekanat_asf@mail.ru

Харитонов Александр Александрович

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Махачкала, Россия

Аспирант

E-mail: dekanat_asf@mail.ru

Ахмедов Магомедшарип Нурмагомедович

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Махачкала, Россия

Аспирант

E-mail: dekanat_asf@mail.ru

**Анализ видов технологий
по переработке строительных материалов
по показателям углеродного следа**

Аннотация. С повышением темпов строительства гражданских объектов и ростом социально-экономического развития, наблюдается значительное увеличение потребления строительных материалов на основе природного сырья, что делают актуальными исследования в поиске альтернативной сырьевой базы для строительной отрасли в целом. Рациональным решением с точки зрения экологии и экономики становится вторичная переработка

строительных материалов и применение промышленных отходов. Тенденция применения строительных отходов в качестве заполнителей для бетонных изделий и конструкций, является на сегодняшний день наиболее эффективным решением снижения отрицательной нагрузки на окружающую среду, а также имеет ряд экономических преимуществ, при выборе оптимальной технологии переработки. В данной статье рассмотрены состояние, тенденции и проблемы развития строительного сектора экономики в направлении энергоэффективных технологий и принципов устойчивого развития, способствующих снижению негативного влияния строительного сектора на окружающую среду в городских условиях. Указаны основные причины повышения интереса к исследованию экологических способов переработки строительных материалов. Дано описание характеристик и уникальных свойств сырья, подвергшихся различным методам регенерации. Приводятся преимущества, которые открывает инновационная система «зеленого» строительства с внедрением технологий по переработке строительных отходов. Авторами представлен анализ наиболее распространенных технологий и методик по переработке бетонного лома во вторичный заполнитель, а также приводятся преимущества и недостатки каждого метода регенерации бетонного лома. Раскрываются опыт исследований инновационных методов переработки бетона в зарубежных странах, перспективы и проблемы дальнейшего развития «зеленых» технологий в российской строительной отрасли, а также приоритеты и перспективы для выхода на рынок отечественных производителей бетонной продукции на основе вторичного заполнителя, которые позволят обеспечить снижение добычи и производства природного сырья. Сформулированы дальнейшие направления исследований проблем развития зеленых технологий в строительном секторе экономики.

Ключевые слова: строительство; рециклинг; бетонные изделия; устойчивое развитие; экология; регенерированный заполнитель; зеленые технологии

С повышением темпов строительства гражданских объектов и ростом социально-экономического развития, наблюдается значительное увеличение потребления строительных материалов на основе природного сырья [1], что делают актуальными исследования в поиске альтернативной сырьевой базы для строительной отрасли в целом. Рациональным решением с точки зрения экологии и экономики становится вторичная переработка строительных материалов и применение промышленных отходов. Тенденция применения строительных отходов в качестве заполнителей для бетонных изделий и конструкций, является на сегодняшний день наиболее эффективным решением снижения отрицательной нагрузки на окружающую среду, а также имеет ряд экономических преимуществ, при выборе оптимальной технологии переработки.

Существует ряд технологий по переработке строительных отходов, начиная от сноса строительного объекта и перевозки отходов на нелегальные площади захоронения, до дробления с фракционированием полученных обломков непосредственно на той же площадке сноса и вывоза для дальнейшей очистки от примесей и вторичного внедрения в строительную продукцию. При каждом способе переработки следует закладывать расходы на снос, сортировку, логистику и переработку материала. Большинство технологий переработки характеризуется высоким потреблением энергоресурсов, что приводит к выбросам загрязняющих веществ и, в связи с этим, определяющим фактором эффективности применения переработанного сырья можно назвать технологию переработки отходов с минимальными показателями углеродного следа. Поэтому необходимо проводить исследования, позволяющие определить наиболее эффективную технологию переработки отходов с минимальным влиянием на окружающую среду и получить вторичный заполнитель не уступающим по своим характеристикам природному.

На конечное качество вторичного заполнителя будет влиять степень его очистки на этапе переработки. От этого зависит уровень вовлечения переработанного материала в производство новой строительной продукции.

Целью данного исследования является анализ и выявление наиболее эффективной технологии переработки строительных отходов с учетом углеродного следа на всем его жизненном цикле и определение наиболее рационального подхода к вопросу внедрения вторичных заполнителей при строительстве нового объекта.

В строительной отрасли за последнее время наблюдается значимый рост потребления энергии, около 45 % от мирового потребления энергии. На данный сектор промышленности приходится около 50 % от общего мирового объема выбросов CO₂, что делает эту отрасль крупнейшим потребителем энергии и одним из лидеров по выбросам углекислого газа [2–4]. Актуальность исследований по переходу строительного сектора экономики на «зеленые технологии» будет со временем только возрастать.

Наиболее распространенный и практичный строительный материал, применяемый в строительстве это бетон, для производства которого затрачивается колоссальное количество природных материалов, такие как вода, цемент и заполнитель (щебень, гравий, песок), на долю последних приходится до 80 % от общего объема бетонной смеси. Параллельно прогнозируется ежегодное повышение мирового спроса на заполнители для бетона, около 5 % и достигнет от 60 до 75 млрд тонн к 2025 году, а Россия входит в десятку лидеров по потреблению природных ресурсов для строительного сектора экономики [3–6]. Такие объемы однозначно способствуют повышенным выбросам CO₂ и потреблению энергоресурсов.

Исходя из вышесказанного, можно утверждать, что ежегодное повышение спроса на природные заполнители оказывают отрицательное влияние на окружающую среду и принципы устойчивого развития. С другой стороны, строительная отрасль образует один из самых объемных потоков отходов в промышленности во всем мире. За последние 10 лет по данным Ассоциации по переработке отходов строительства и сноса (CDRA), с 2015 года образуется от 550 до 800 миллионов тонн строительных отходов ежегодно [4–6]. Основная часть отходов отправляется на свалки для дальнейшего захоронения, что также негативно воздействует на экологию. Такая экологическая ситуация будет только усугубляться со временем и уже приводит к необходимости переработки строительных отходов и замещению природного сырья на вторичный переработанный [7–9]. Исследования вторичного сырья, полученных из отходов строительного производства и переработки бетона, для изготовления новой бетонной смеси, становятся все более актуальными [8–10]. Рядом исследований установлено, что основной проблемой, приводящей к снижению качества бетона при использовании вторичного заполнителя, является слабая межфазная связь растворной части и заполнителя. Это подтверждается исследованиями [9; 10] установившие, что слабая адгезия между растворной частью и вторичным заполнителем влияет на такие характеристики как более высокая пористость и низкая плотность, а также по сравнению с природными заполнителями вторичный заполнитель имеет повышенное водопоглощение. Влияние также оказывают различные примеси в переработанном бетоне их вид и пропорция загрязнения в заполнителе. В том числе и растворная часть переработанного заполнителя из бетонного лома, его качество является одним из факторов, способствующих ухудшению качества бетона. Все эти факторы отрицательно сказываются как на физико-механических свойствах бетона, так и на его долговечность.

Следовательно, научный интерес представляется в совершенствовании физико-механических свойств вторичных заполнителей таким образом, чтобы они могли заменить заполнители природного происхождения. Вопросы, связанные с совершенствованием вторичного заполнителя, в основном включают в себя решения по снижению его пористости и

водопоглощения с целью повышения прочностных характеристик и долговечности полученного бетона.

Различные подходы и методы по минимизации вредного воздействия заполнителя на основе переработанного бетона и способы повышения характеристик бетонных изделий на его основе, отражены в научных трудах многих исследователей. В исследованиях приведены результаты апробирования методов смешивания переработанного и природного заполнителя в разных соотношениях, варьирование соотношением воды и цемента, обработка поверхности, то есть растворной части вторичного заполнителя с последующей обработкой. Таким образом, в данной работе проведен обзор методов переработки вторичного заполнителя на основе бетонного лома с определением достоинств и недостатков, ограничений и применимости каждого метода.

Методы регенерации вторичного заполнителя на основе бетонного лома можно разделить на две категории. Первая категория подразумевает удаление поверхностного слоя растворной части вторичного заполнителя с применением различных методов, а вторая категория подразумевает модификацию и повышение характеристик вторичного заполнителя за счет улучшения качества растворной части заполнителя.

Основным фактором, понижающим качество вторичного заполнителя, является слабое сцепление его растворной части. Это приводит к низкой плотности, высокой пористости и водопоглощению, что негативно сказывается на качестве самого регенерированного заполнителя и изделий на его основе. Удаление малопрочного слоя раствора со вторичного заполнителя возможно с применением механических, химических, термических или комбинированных методов переработки.

Одним из наиболее экономичным и маломатериалоемким методом регенерации вторичного заполнителя на основе бетонного лома, рассматривается термическая обработка. Данный метод применим двумя способами, при помощи традиционного и микроволнового нагрева.

Способ традиционного нагрева вторичного заполнителя заключается в нагревании при различных температурах в течении 2 часов. Возникающие термические напряжения при воздействии разницы температур теплового расширения исходного заполнителя (щебень, гравий) и растворной части способствуют отделению малопрочного раствора от поверхности, что облегчает его удаление. В исследовании [10; 11] было установлено, что при нагревании вторичного заполнителя свыше 300°C наблюдается ослабление межфазного контакта раствор-заполнитель за счет дегидратации и снижение адгезии под воздействием термических напряжений. Также в исследованиях [11–13] вторичный заполнитель из бетонного лома подвергался нагреванию в 700°C и 750°C с целью отделения растворной части и исходного заполнителя, что подтверждает зависимость, чем выше температура обработки вторичного заполнителя, тем легче отделяется растворная часть от исходного заполнителя. Однако чуть позже в работе [12–14] выявлено, что при нагревании вторичного заполнителя от 500°C и выше ухудшают качество регенерированного заполнителя. Применяя метод термической обработки важно тщательно подбирать температуру для обработки.

Обработка вторичного заполнителя методом микроволнового нагрева работает за счет разницы электромагнитных свойств растворной части бетонного лома и его исходного заполнителя (щебень или гравий) [13]. Преимуществом данного метода будет в том, что разрушение и отделение растворной части происходит без повреждений исходного заполнителя, способствуя низкому содержанию слипшегося раствора во вторичном заполнителе [14; 15]. Способ микроволнового нагрева происходит в два этапа. На первом этапе за счет микроволнового нагрева создаются высокие дифференциальные тепловые напряжения

в контактной зоне межфазного перехода между исходным заполнителем и растворной частью за счет чего отделяется слипшаяся растворная часть от вторичного заполнителя (состоящий из природного заполнителя покрытый слоем раствора). На втором этапе дополнительным микроволновым нагревом разрушается или значительно ослабевает прилипший раствор на вторичном заполнителе на более мелкие частицы, состоящие только из растворной части, которые можно просеять через лабораторное сито.

По результатам научных исследований установлено, что наибольшей эффективностью при обработке микроволновым нагревом выделяются крупные фракции вторичного заполнителя, об этом свидетельствует разница соотношений обработанного заполнителя без растворной части. На долю крупных фракций от 20 мм без растворной части приходилось 65 %, а на фракции менее 2 мм около 30 %. Можно подытожить, что наиболее эффективным для обработки (удаления растворной части) крупных фракций вторичного заполнителя будет метод микроволновой обработки.

Техника механической обработки. Механическая очистка бетонного лома в шаровых мельницах происходит в барабане, который разделяется на секции, где находятся стальные шарики. Удаление растворной части происходит за счет перетирания и удара бетонного лома со стальными шарами в барабане. Такой метод обеспечивает механическое измельчение перерабатываемого сырья, улучшая геометрическую форму вторичного заполнителя за счет столкновения и эффекта отслаивания. Недостатком данного метода является значительное количество поврежденных частиц вторичного заполнителя, подвергшихся ударному измельчению, что способствует появлению микротрещин [14–16].

Тепломеханическая технология переработки вторичного заполнителя представляет собой симбиоз двух методов обработки. Во-первых, вторичный заполнитель подвергается традиционному методу нагревания при температуре 300–500°C, где в результате возникающих тепловых напряжений происходит высушивание слипшегося раствора и ослабление его сцепления с исходным заполнителем. Далее происходит второй этап обработки, который включает механическое измельчение до полного удаления налипшей растворной части из перерабатываемого бетона. Результаты исследований комбинированного метода переработки, представленные в работах [9; 10; 17] показывают, что растворная часть может быть удалена методом нагревания в диапазоне температур от 200°C до 600°C с последующей интенсивной механической обработкой в течении определенного времени (от 3 до 14 минут). В целом данная технология переработки положительно сказывается на показателях плотности вторичного щебня.

Вывод

Существует множество экономических и экологических факторов, которые должны учитываться, при применении этих методов, таких как стоимость обработки, время обработки и количество затраченной энергии или выбросов углерода для достижения наиболее приемлемых результатов обработки вторичного заполнителя.

Все вышеперечисленные методы переработки бетонного лома подразумевают потребление большого количества энергозатрат, а также побочное образование большого количества цементной пыли, которая на сегодняшний день еще не поддается утилизации и не считается полезным отходом промышленности.

Представленные в данной работе методы позволяют добиться полного обезвреживания вторичного заполнителя, что по техническим показателям представляется выгодным, но в тоже время экологические аспекты побуждают исследовать возможность получения вторичного заполнителя без значительных энергозатрат и предварительной обработки.

В связи с этим, научный интерес и перспективы дальнейших исследований альтернативных способов переработки с целью расширения диапазона применения вторичного заполнителя, соответствующий критериям низкого углеродного следа, представляется в изучении химических методов обработки бетонного лома и выявление наиболее энергоэффективных технологий и методов регенерации отходов строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Олейник П.П., Олейник С.П. Организация системы переработки строительных отходов. М.: МГСУ, 2009. 251 с.
2. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов-на Дону: Феникс, 2007. 368 с.
3. Кудрявцева В.А. Анализ природно-ресурсного и экологического аспектов функционирования строительного комплекса региона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2016. — № 2(17). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-prirodno-resursnogo-i-ekologicheskogo-aspektov-funktsionirovaniya-stroitel'nogo-kompleksa-regiona>.
4. Кашина И.В., Левенко А.Д., Самойлова А.Ю. Проблема экологичности строительных материалов. Анализ жизненного цикла зданий и сооружений // Строительство и техногенная безопасность. — 2017. — № 8(60). — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problema-ekologichnosti-stroitelnyh-materialov-analiz-zhiznennogo-tsikla-zdaniy-i-sooruzheniy>.
5. Бибик М.С., Семенюк С.Д. Влияние физикомеханических характеристик рециклированного щебня из дробленого бетона различных классов по прочности на сжатие на свойства бетонной смеси и бетона // Вестник Белорусско-Российского университета. 2010. № 3(28). С. 128–134.
6. Муртазаев С.А.Ю., Саламанова М.Ш., Гишкалаева М.И. Формирование структуры и свойств бетонов на заполнителе из бетонного лома // Бетон и железобетон. 2008. № 5. С. 25–28.
7. Limbachiya, M.C., Koulouris, A., Roberts, J.J. and Fried, A.N. "Performance of recycled aggregate concrete", RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development; 6–7 Sep 2004, Koriyama, Japan. ISBN 2912143551, URL: <http://dx.doi.org/10.1617/2912143640.015>.
8. Safiuddin, Md., Alengaram, U.J., Salam, M.A., Jumaat, M.Z., Jaafar, F.F., and Saad, H.B. (2011). "Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate." Materials Research, Vol. 14, No. 2, pp. 1–8, DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000039>.
9. Yong, P.C. and Teo, D.C.L. (2009). "Utilisation of recycled aggregate as coarse aggregate in concrete". Journal of Civil Engineering Science and Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 1–6, DOI: <https://doi.org/10.33736/j.cest.60.2009>.
10. M. Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, and S. Maiti, "Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete — A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review", Constr. Build. Mater., Vol. 68, 2014, pp. 501–516. DOI: 11.1007/978-981-13-0362-3_78.

11. Ефименко А.З. Бетонные отходы — сырье для производства эффективных строительных материалов // Материалы. Технологии бетонов. — 2014. — № 2. — С. 17–21.
12. Коровкин М.О. и др. Использование дробленного бетонного лома в качестве заполнителя для самоуплотняющегося бетона // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 3(37).
13. Заурбеков Ш.Ш., Муртазаев С.-А.Ю., Сайдумов М.С., Абдуллаев М. Утилизация бетонного и железобетонного лома // Экология и промышленность России. — 2011. — № 2.
14. Фахратов М.А. и др. Эффективное использование отходов бетонного лома в качестве заполнителя в производстве бетонных и железобетонных изделий // Стройпрофиль. — 2012. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://stroyprofile.com/archive/4950>.
15. Ламжав О. Исследование свойства вторичного заполнителя и бетона, изготовленного из бетонного лома // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: сб. ст. по матер. VIII междунар. науч.-практ. конф. № 8(8). — Новосибирск: СибАК, 2017. — С. 71–77.
16. Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Фатыхов Г.А. К комплексному использованию шлаков из бетонного лома в производстве шлакощелочных вяжущих // Известия КазГАСУ. 2011. № 2. С. 218–223.
17. Вопросы устойчивого развития в промышленности строительных материалов и конструкций / Г.Н. Хаджишалапов, М.П. Нажуев, Э.А. Салахов, У.И. Исаева, М.Ш. Абдурахимов, Т.А. Гасанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. — 2022. — № 1. — С. 47–58. DOI: 10.15593/2409-5125/2022.1.04.

Nazhueva Mukhuma Pakhrudinovich

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia
E-mail: nazhueva17@mail.ru

Poshev Azrail Umar-Bekovich

National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia
E-mail: azrail.poshev@mail.ru

Isaeva Ulana Isakovna

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia
E-mail: dekanat_asf@mail.ru

Kharitonov Alexander Alexandrovich

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia
E-mail: dekanat_asf@mail.ru

Akhmedov Magomedsharip Nurmagomedovich

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russia
E-mail: dekanat_asf@mail.ru

Analysis of types of technologies for the processing of building materials by carbon footprint indicators

Abstract. With the increase in the rate of civil construction and the growth of socio-economic development, there is a significant increase in the consumption of construction materials based on natural raw materials, which makes research in the search for an alternative raw material base for the construction industry as a whole relevant. Rational solution in terms of ecology and economy becomes the recycling of construction materials and the use of industrial waste. The trend of using construction waste as aggregates for concrete products and structures, is currently the most effective solution to reduce the negative impact on the environment, and also has a number of economic advantages, when choosing the optimal processing technology. This article considers the state, trends and problems of development of the construction sector of the economy in the direction of energy-efficient technologies and principles of sustainable development that help to reduce the negative impact of the construction sector on the environment in urban conditions. The main reasons for the increased interest in the research of environmentally friendly methods of recycling construction materials are indicated. The characteristics and unique properties of raw materials subjected to various methods of recycling are described. The advantages offered by the innovative system of "green" construction with the introduction of construction waste recycling technologies are given. The authors present an analysis of the most common technologies and methods of recycling concrete scrap into secondary aggregate, as well as the advantages and disadvantages of each method of regeneration of concrete scrap. The experience of researches of innovative methods of recycling concrete in foreign countries, the prospects and problems of further development of "green" technologies in the Russian building industry, and also priorities and prospects for entering the market of domestic producers of concrete products on the basis of secondary aggregate, which will allow to provide decrease in extraction and production of natural raw materials are revealed. Formulated further research directions of the problems of development of green technologies in the construction sector of the economy.

Keywords: construction; recycling; concrete products; sustainable development; ecology; recycled aggregate; green technology