

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ БЕТОНА С ДОБАВЛЕНИЕМ ОТРАБОТАННОГО ФОРМОВОЧНОГО ПЕСКА

С.И. Рощина¹, М.С. Лисятников², М.В. Тужилова³

¹ зав. каф. СК ВлГУ, д.т.н., профессор, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, (rsi3@mail.ru, (4922) 479-804)

² к.т.н., доцент кафедры СК ВлГУ, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, (mlisyatnikov@mail.ru, 8-904-035-83-35)

³ аспирант кафедры СК ВлГУ, 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, (tuzhilova.mar@yandex.ru, 8-996-442-18-34)

Аннотация

Предмет исследования: работа посвящена изучению возможности применения отработанного формовочного песка (ОФП), являющегося отходом литейного производства, в составе бетонных смесей в качестве частичного заменителя природного песка. Исследование направлено на решение актуальной проблемы рационального использования промышленных отходов и снижения экологической нагрузки, связанной с их утилизацией и добычей природных материалов.

Цели: разработать состав бетона на основе рециклингового отхода с улучшенными прочностными и экономическими показателями. В качестве отходов предполагается использовать отработанный формовочный песок.

Материалы и методы: Экспериментальные образцы бетона были изготовлены с замещением природного песка ОФП в количестве 10 %, 20 % и 30 %. В качестве вяжущего использовались портландцементы классов 22,5Н, 32,5Н и 42,5Н. Прочность бетона на сжатие определялась тремя методами: ультразвуковым, импульсным и методом разрушения в соответствии с ГОСТ.

Результаты: Наибольшая прочность бетона (27,1 МПа) была достигнута при замещении 20 % песка ОФП после 28 суток твердения. При увеличении содержания отходов свыше 30 % наблюдается снижение прочности вследствие увеличения пористости и водопоглощения.

Выводы: Использование ОФП в составе бетонных смесей является перспективным направлением, обеспечивающим улучшение экологических и экономических показателей производства. Оптимальным считается замещение природного песка на уровне 20 %, что позволяет получить бетон класса В20 при сохранении требуемых прочностных характеристик.

ВВЕДЕНИЕ

Современная строительная отрасль характеризуется постоянным ростом объемов производства и, как следствие, увеличением количества промышленных отходов. Одновременно наблюдается дефицит природных строительных материалов, в частности песка, что обусловлено интенсивной добычей, ростом цен и ухудшением экологической обстановки. В этих условиях особую актуальность приобретает задача рационального использования промышленных отходов в производстве строительных материалов, в частности бетона [1]. Одним из перспективных направлений является использование отработанного формовочного песка (ОФП) в качестве частичного или полного заменителя природного песка. Этот подход позволяет одновременно решать несколько важных задач: снижение

нагрузки на окружающую среду за счет сокращения объемов отходов, уменьшение объемов добычи природного песка, сокращение выбросов углекислого газа и себестоимости бетонных смесей [2]. Таким образом, проблема исследования заключается в необходимости изучения возможности и целесообразности применения ОФП в бетонных смесях с целью повышения экологичности и экономической эффективности строительного производства. Результаты подобных исследований имеют важное значение для развития строительной науки, создания новых видов композитных материалов и совершенствования технологий переработки промышленных отходов.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ отечественных и зарубежных исследований подтверждает высокую актуальность использования отходов песчано-смоляных литейных форм в производстве бетона. Большинство авторов отмечают экологическую и экономическую целесообразность этого направления. Согласно исследованиям Г. Гарсии и других авторов [3,4], в настоящее время почти все отходы песчано-смоляных литейных форм вывозятся на полигоны, что приводит к значительным экологическим издержкам. Использование таких отходов в качестве заполнителя бетона позволяет сократить нагрузку на окружающую среду и снизить объемы добычи природного песка, добыча которого становится все более проблематичной из-за истощения ресурсов и роста цен. Исследования Метоса [5] показали, что применение литейных отходов может снизить себестоимость бетонных смесей до 50–60 % по сравнению с использованием природного песка. Кроме того, использование отходов способствует уменьшению выбросов CO_2 в атмосферу за счет сокращения энергозатрат на добычу и транспортировку природных материалов. Ряд экспериментов [6,7] показали, что при частичной замене природного песка (до 30 %) прочностные характеристики бетона не только не ухудшаются, но в некоторых случаях даже повышаются. Отмечено улучшение прочности на сжатие, удобоукладываемости и долговечности. Однако при замене более 50 % песка наблюдается снижение прочности и увеличение водопоглощения, что связывают с угловатостью частиц и их высокой пористостью. Исследования Чжена и Сабура показали, что использование до 30 % отходов не оказывает негативного влияния на механические свойства, а в некоторых случаях даже улучшает прочность на изгиб [8,9]. При этом использование таких материалов может снизить стоимость бетона марки М25 на 3–7 %. Таким образом, анализ литературы показывает, что использование отходов песчано-смоляных литейных форм в бетоне является перспективным направлением, сочетающим экологические и экономические преимущества. Для дальнейшего развития этого направления необходимо проведение экспериментальных исследований по определению физико-механических свойств бетонов с различной степенью замещения природного песка отходами литейного производства.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовалось влияние частичной замены песка рециклинговым отработанным формовочным песком (ОФП) на прочностные свойства бетона на сжатие [10]. Были приготовлены четыре варианта бетонных смесей, в которых ОФП заменяли песок в процентном соотношении 10 % с добавлением портландцемент класса 22,5Н, 20 % с добавлением портландцемент класса 32,5Н и 30 % от общего

объема мелкого заполнителя с добавлением портландцемент класса 42,5Н. Эталонные образцы изготавливались без добавления ОФП. Образцы бетона изготавливались в формах размером 100×100×100 мм и испытывались на прочность на сжатие на 7, 14 и 28 суток твердения. Всего изготовлено 144 образца, в каждой серии испытаний – по 12 образцов. Результаты испытаний показали, что выбранное количество образцов для каждой серии достаточно для получения репрезентативных данных.

Использовались следующие материалы:

- портландцемент класса 22,5Н, 32,5Н, 42,5Н соответствующий требованиям ГОСТ 31108–2020;
- очень тонкий песок, соответствующий требованиям ГОСТ 8736–2014 с модулем крупности 0,63;
- отходы песчано-смоляных литейных форм, предварительно подготовленные (измельченные, просеянные, высушенные).
- дистиллированная вода по ГОСТ Р 58144–2018;
- гранитный щебень фракции 5–20 мм, соответствующий требованиям ГОСТ 8267–93.

Состав был выбран для бетона класса В20, в котором сыпучий компонент замещался в процентном соотношении 10, 20 и 30 %.

Определение кубиковой прочности бетона

Для оценки механических свойств бетонных образцов применялись три независимых метода:

1. Ультразвуковой метод (УЗМ). Скорость распространения ультразвуковых волн в образцах определялась прибором УКС-МГ4 № 1061. УКС-МГ4 — портативный ультразвуковой прибор для неразрушающего контроля качества бетона. Он измеряет скорость распространения ультразвуковых волн (УЗВ) через материал, которая коррелирует с его плотностью, прочностью и наличием дефектов (пор, трещин). Прибор оснащён двумя датчиками (излучатель и приёмник), работающими на частоте 50–100 кГц, цифровым дисплеем с разрешением 0,1 м/с и встроенной памятью для хранения до 1000 измерений. УКС-МГ4 соответствует ГОСТ 17624-2012 и позволяет проводить калибровку для конкретных составов бетона, учитывая влияние ОФП. Измерения проводились на трех взаимно перпендикулярных направлениях для каждого образца, и вычислялось среднее значение.

2. Импульсный метод (ИМ). Для определения статического модуля упругости $E_{ст}$, ГПа, использовался прибор ИПС-МГ4.03 № 8528, основанный на измерении деформаций образца под действием известной нагрузки. ИПС-МГ4.03 — специализированный прибор для определения статического модуля упругости ($E_{ст}$, ГПа) бетона методом импульсного нагружения. Устройство измеряет деформации образца под действием контролируемой кратковременной нагрузки, что позволяет оценить упругие свойства, важные для проектирования сейсмостойких и долговечных конструкций. Диапазон измерений модуля упругости составляет 5–50 ГПа, с погрешностью $\pm 5\%$. ИПС-МГ4.03 также поддерживает измерение динамического модуля упругости, что делает его универсальным для анализа бетона в лабораторных условиях. Статический модуль упругости отражает способность материала сопротивляться деформации под нагрузкой. Импульсный метод позволяет моделировать реальные нагрузки, возникающие в

строительных элементах. Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 22690-2015.

3. Метод разрушения. Максимальная разрушающая нагрузка определялась на прессе ПИ-2000 в соответствии с ГОСТ 17624-2012.

Прочность бетона на сжатие $R_{сж}$, МПа, вычислялась по формуле (1):

$$R_{сж} = \frac{\alpha \cdot F}{A} \quad (1)$$

где, $\alpha=0,95$ - масштабный коэффициенты для приведения прочности бетона к прочности бетона в образцах базовых размера и формы (150x150x150); F - разрушающая нагрузка, Н; A - площадь рабочего сечения образца, мм².

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кривые зависимости нагрузки от деформации образцов бетона после воздействия нагрузки имели пик, где координата оси ординат соответствует максимальной разрушающей нагрузки на сжатие образцов бетона. На графиках (рис.1-3) представлена зависимость нагрузки от деформации для бетонных образцов с различным замещением песка на ОФП на 7, 14 и 28 суток твердения, а также для эталонных образцов.

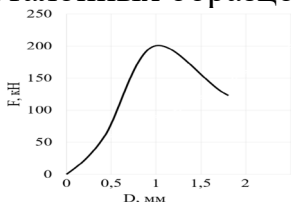


Рис. 1. График зависимости нагрузки от деформации для эталонного бетонного образца на 7 суток твердения

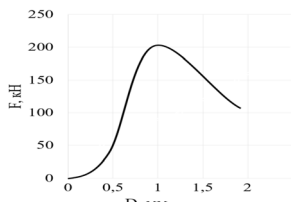


Рис. 2. График зависимости нагрузки от деформации для бетонного образца с 30 % замещением песка на ОФП на 7 суток твердения

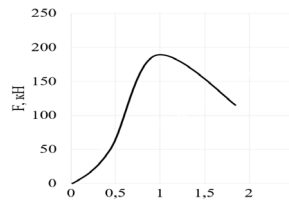


Рис. 3. График зависимости нагрузки от деформации для бетонного образца с 10 % замещением песка на ОФП на 14 суток твердения

На диаграмме (рис. 4) указана зависимость прочности от процентного замещения и выдержки образцов.

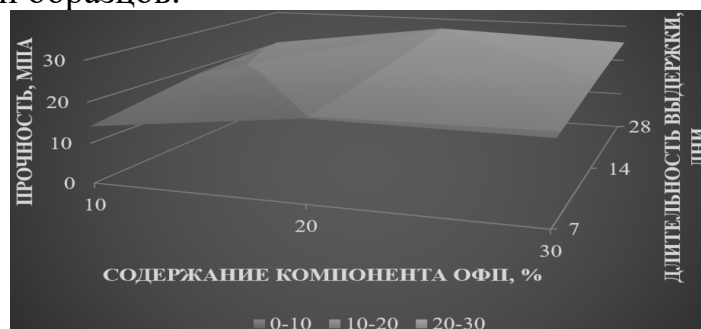


Рис. 4. Зависимость прочности от процентного замещения и выдержки образцов

Максимальная прочность (27,1 МПа) бетона наблюдалась при замещении 20 % сыпучих материалов на ОФП через 28 суток твердения.

Минимальная прочность (14,3 МПа) бетона была отмечена при замещении 10 % через 7 суток.

ВЫВОДЫ

Проведённые исследования показали, что использование ОФП в качестве частичного заменителя природного песка при производстве бетона является технически и экологически обоснованным решением.

Экспериментальные данные подтвердили, что оптимальным является замещение природного песка на 20 % отработанным формовочным песком. При таком соотношении достигается максимальная прочность бетона на сжатие — 27,1 МПа через 28 суток твердения, что соответствует классу бетона В20.

Увеличение доли замещения выше 30 % приводит к снижению прочностных характеристик бетона, что связано с повышенной пористостью и водопоглощением ОФП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чебуркова, С. Н. Исследование напряженного-деформированного состояния железобетонных колонн в каркасах многоэтажных зданий / С. Н. Чебуркова, С. И. Рощина // Инновации и инвестиции. – 2020. – № 9. – С. 234-239. – EDN VJONDD. Шишов, И. И.

2. Попова, М.В. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых элементов с учетом полной диаграммы деформирования бетона / М. В. Попова, М. С. Лисятников, А. Н. Сергеева, А. К. Модин // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2017. – № 12(1000). – С. 44-45. – EDN ZTPJGF.

3. Garcia D., Aghajanian A., Tamayo P., Rico J., Thomas C. Siderurgical aggregate cement-treated bases and concrete using foundry sand. *Applied Sciences*. — 2021. — № 11. — Pp. 21-33.

4. García D., Aghajanian A., Cabrera R., Tamayo P., Sainzaja J., Thomas C. Influence of partial and total replacement of used foundry sand in self-compacting concrete. *Applied Sciences*. — 2023. — № 13. — Pp. 45-63.

5. Matos P., Marcon M., Schankoski R., Prudêncio L. Applications of waste foundry sand in conventional and dry-mix concretes. *J. Environ. Manag.* — 2019. — № 244. — Pp. 294-303.

6. Awoyera P., Thomas C., Kirgiz M. The Use of Foundry Sand for Recycled Aggregate Concrete. In *The Structural Integrity of Recycled Aggregate Concrete Produced with Fillers and Pozzolans*. Civil and Structural Engineering; Woodhead Publishing. — 2022. — Pp. 3–24.

7. Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*. — 2019. — №12 (1). — Pp.7-21.

8. Sabour M., Derhamjani G., Akbari M., Hatami A. Global trends and status in waste foundry sand management research during the years 1971-2020: a systematic analysis. *Environ. Sci. Pollut. Res.* — 2021. — № 28. — Pp. 37312-37321.

9. Zheng J., Chen A., Zheng W., Zhou X., Bai B., Wu J., Ling W., Ma H., Wang W. Effectiveness analysis of resources consumption, environmental impact and production efficiency in traditional manufacturing using new technologies: case from sand casting. *Energy Convers. Manag.* — 2020. — № 209. — Pp. 96-111.

10. Лисятников, М. С. Кубиковая прочность бетона с добавлением отходов песчано-смоляных литейных форм / М. С. Лисятников, М. В. Тужилова, Д. О. Мясников, К. М. Терентьев // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2024. – № 4(32). – С. 18-29. – DOI 10.25686/2542-114X.2024.4.18.