

УДК 691.542:691.327

© В. Д. Староверов, канд. техн. наук, доцент
© А. С. Сидорова, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: tsmm@spbgasu.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-6-74-84

© V. D. Staroverov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© A. S. Sidorova, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: tsmm@spbgasu.ru

ВЛИЯНИЕ ПОВЫШЕННОГО СОДЕРЖАНИЯ ШЛАКОВ В ВЯЖУЩЕМ НА СВОЙСТВА ВИБРОПРЕССОВАННЫХ ИЗДЕЛИЙ

THE EFFECT OF INCREASED SLAG CONTENT IN THE BINDER ON THE PROPERTIES OF VIBROPRESSED PRODUCTS

На основе анализа существующей нормативной базы, требования которой распространяются на цементы и бетоны, на примере технологии изготовления вибропрессованных изделий выявлены ограничения по применению цементов со шлаком для их изготовления. Определено, что уровень развития стандартизации в рассматриваемой предметной области не отвечает современным научным достижениям и результатам наработанного практического опыта. В результате исследований вибропрессованной тротуарной плитки, изготовленной на основе цементов, содержащих шлак в количестве 15 %, установлено, что все показатели качества соответствуют нормируемому уровню. Тем самым подтверждена необходимость внесения изменения в нормативную базу на вибропрессованные изделия в части применения цементов, содержащих шлаки (по крайней мере в количестве 15 %).

Ключевые слова: вибропрессованные изделия, гранулированный шлак, цемент, шлакопортландцемент, коррозионная стойкость, дорожный бетон, показатели качества и долговечности тротуарной плитки.

Based on an analysis of the existing regulatory framework, the requirements of which apply to cement and concrete, on the example of technology for manufacturing vibropressed products, there have been identified restrictions on the use of cements with slag for their production. It has been determined that the level of standardization development in the subject area under consideration does not correspond to modern scientific achievements and the results of accumulated practical experience. As a result of investigation of vibropressed paving slabs made on the basis of cements containing slag in an amount of 15 %, it has been found out that all quality indicators correspond to the standardized level. This confirms the need to amend the regulatory framework for vibropressed products regarding the use of cements containing slag (at least 15 %).

Keywords: vibropressed products, granulated slag, cement, Portland slag cement, corrosion resistance, road concrete, quality and durability indicators of paving slabs.

Введение

В России реализуются государственные программы поддержки предприятий строительной индустрии, нацеленные на широкое вовлечение попутных продуктов промышленности в технологии изготовления строительных материалов и изделий.

Такой подход способствует решению экологических проблем и соответствует Климатической доктрине Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. № 812¹),

¹ Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2023 г. № 812 «Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/49910>

Федеральному закону «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ², распоряжению Правительства Российской Федерации от 15.06.2022 г. № 1557-р³, распоряжению Правительства РФ от 02.08.2023 г. №2094-р⁴, Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу до 2030 г.⁵, отраслевой программе «Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022–2030 годы»⁶ и проч.

Наиболее оптимальным решением по глубокой переработке попутных продуктов промышленности является выпуск широкой номенклатуры цементов с разнообразными минеральными добавками [1–3], что обеспечивает ресурсосбережение, снижение материало- и энергоемкости промышленности строительных материалов.

В настоящее время процент утилизации золошлаковых отходов составляет не более 12 %, в то время как их ежегодный прирост измеряется миллионами тонн. В соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 г.⁷ в общем объеме отходов доля утилизированных золошлаковых отходов должна быть увеличена с 8,4 % (базовый уровень по данным 2018 г.)

² Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/17718>

³ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 15.06.2022 г. № 1557-р. URL: <http://government.ru/docs/all/141543/>

⁴ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 02.08.2023 г. №2094-р. URL: <http://government.ru/docs/49212/>

⁵ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 10.05.2016 г. № 868-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/RnBfAw072e3tmmykU2lrlh1LI1HaHeG0q.pdf>

⁶ Отраслевая программа «Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022–2030 годы» в части вовлечения отходов, образующихся при строительстве объектов капитального строительства, транспортной инфраструктуры и сетей инженерно-технического обеспечения их реконструкции, капитального ремонта, сноса, а также отходов, образующихся при функционировании объектов жилищно-коммунального хозяйства, и отходов иных отраслей в экономический оборот на период до 2030 года. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/231814/>

⁷ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 г. № 1523-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDT4IgsApssm6mZRB7wx.pdf>

до 50 %, поэтому необходимо исследовать возможность глубокого вовлечения в технологии производства строительных материалов и изделий попутных продуктов промышленности (зол-уносов и шлаков) в большем объеме по сравнению с существующими предложениями, в том числе закрепленными нормативной документацией. Такой подход существенным образом повлияет на снижение углеродного следа цементной промышленности, так как снижаются выбросы CO₂ на 9–10 % на каждые 10 % замещенного шлаком клинкера [4, 5].

Наиболее «распространенными добавками в цемент являются гранулированные доменные шлаки — отходы металлургического производства, шлаки — отходы цветной металлургии и химических производств, золошлаковые отходы, которые являются прямыми заменителями клинкера»⁸, а их доля в цементе может достигать 95 %⁹ [6–10]. Гранулированный шлак — это ценный сырьевой материал для получения бесклинкерных вяжущих [11, 12]. В этой связи проблема более глубокого вовлечения в технологию изготовления бетона и изделий на его основе (в частности, технологию изготовления вибропрессованных изделий), попутных отходов промышленности (шлаков и зол) сохраняет свою актуальность.

Известно, что гранулированные шлаки на протяжении не одного десятилетия являются объектом исследования с точки зрения их применения в цементах и бетонах. Изучению шлаков посвящены труды Боженова П. И., Бута Ю. М., Горшкова В. С., Лапина В. В., Будникова П. П., Глуховского В. Д., Рояка С. М. и других отечественных и зарубежных ученых. Но именно опыт СССР и современный практический опыт

⁸ ИТС 6-2022 «Производство цемента» (Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям от 16.12.2022 № 6-2022). URL: https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1843&etkstructure_id=1872&

⁹ В номенклатуру цементов по ГОСТ 31108-2020 включен шлакопортландцемент ЦЕМ III/C с максимальным содержанием гранулированного шлака в количестве 95 %.

России или других стран показали, что гранулированный шлак играет роль полноценной минеральной добавки к цементам для гражданского и дорожно-транспортного строительства. При этом в СССР было доказано [13, 14], что даже при открытом способе помола клинкера допускается введение в портландцемент гранулированного шлака от 10 % и более, что обеспечивает необходимую долговечность бетона изделий, эксплуатируемых в агрессивных условиях, в том числе высокую коррозионную стойкость по отношению к действию противогололедных реагентов. Это подтверждается практическим опытом как СССР, так и Российской Федерации [15–17].

В настоящее время требования нормативных документов косвенно влияют на объемы глубокой переработки золошлаковых отходов промышленностью строительных материалов, не способствуя их увеличению. Например, ГОСТ 6665-91 и ГОСТ 17608-2017 ограничивают применение цементов с содержанием минеральных добавок, в том числе гранулированного доменного шлака (не более 5 %) для изготовления бортовых камней и тротуарных плит.

Стоит отметить, что в последнее время Минстрой РФ совместно с Росстандартом активно проводят политику отказа от так называемого предписывающего метода в стандартизации и перехода к параметрическому нормированию, для чего планируется запустить масштабную программу актуализации существующей нормативной базы и разработки новых стандартов. В этой связи жесткое нормирование (особенно в части предъявления требований к сырьевым материалам) становится неактуальным. Если производитель продукции осознает необходимость выпуска конкурентоспособной качественной и безопасной строительной продукции, то его усилия будут определяться этими факторами, поэтому нет необходимости «связывать» изгото-

вителя жесткими требованиями, ограничивающими возможность применения тех или иных сырьевых компонентов, так как его основная задача заключается в обеспечении заданного уровня эксплуатационной надежности готовой продукции, что должно подтверждаться натурными и лабораторными испытаниями.

В соответствии с принятыми нормативными документами под шлакопортландцементом понимают широкую номенклатуру цементов, доля шлака в которых может варьироваться от 6 до 95 %. Авторами же данной статьи проводились исследования с применением цементов, добавление гранулированного шлака в которых составляло 15 %, поэтому мы используем термин не *шлакопортландцемент*, а *цемент со шлаком*.

Цель работы заключается в обосновании возможности применения цементов со шлаками при изготовлении вибропрессованных тротуарной плитки и бортового камня как наиболее широко используемых продуктов в дорожном строительстве. При этом предметом исследования является влияние портландцемента с гранулированным шлаком в количестве 15 % на эксплуатационные характеристики вибропрессованных дорожных изделий.

Методы

Проектирование и корректировка составов бетона для изготовления вибропрессованных изделий выполнялись согласно положениям ГОСТ 27006-2019¹⁰. Контроль и оценка качества готовой продукции производились по ГОСТ 17608-2017¹¹ с применением метрологически аттестованных средств измерений и испытательного оборудования.

Результаты и обсуждения

Анализ нормативной документации, действующей на территории Российской Федерации, на цементы и изделия из бетона

¹⁰ ГОСТ 27006-2019. Бетоны. Правила подбора состава. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200165762>

¹¹ ГОСТ 17608-2017. Плиты бетонные тротуарные. Технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200157324>

показал (табл. 1), что в них содержатся неоднозначные требования, базирующиеся на научном и практическом опыте. В то же время в зарубежных стандартах (к примеру, EN 1338, EN 1339) не содержится ограничительных требований по содержанию гранулированного шлака в качестве добавок к цементам для изготовления бетонов для дорожно-транспортных изделий и конструкций. В некоторых случаях требуется дополнительное обоснование путем проведения испытаний таких бетонов в соответствующей агрессивной среде.

Анализ приведенных в табл. 1 нормативных документов показал следующее: в большинстве стандартов ограничивающие требования по содержанию шлака в цементе отсутствуют; в некоторых стандартах содержится ограничение (применение в цементе либо не более 5 %, либо не более 15 %, либо не более 20 % шлака), также имеется несогласованность по содержанию C_3A (не более 7 % или 8 %). Отсюда следует, что необходимо привести требования, предъявляемые к однородной группе дорожных изделий, эксплуатируемых в определенной среде (XF4), к единообразию. И если нормирование требований по минеральному составу обосновано необходимостью обеспечения коррозионной стойкости, то нормирование по вещественному составу уже не отвечает накопленному научно-практическому опыту.

Ограничивающее требование ГОСТ 6665–91, введенного в действие более 30 лет назад, можно объяснить несоответствием современному уровню научно-технического развития в рассматриваемой сфере. Однако подобные требования в более новых стандартах (например, ГОСТ 17608–2017, который введен в действие с 01.03.2018 г.) не обоснованы. Разработчики стандарта без учета современных результатов научных исследований и практического опыта перенесли в новый документ устаревшие положения

ГОСТ 17608–91, которые, в свою очередь, были зафиксированы ГОСТ 17608–81. Опасения разработчиков стандартов того периода в вопросе ограничения применения шлаков в цементах для дорожных бетонов опирались на неоднозначные результаты исследований. Так, некоторые из них указывали на непрогнозируемое влияние доменных шлаков на долговечность дорожного бетона, что объяснялось проблемами оценки их активности, связанными не только с вариабельностью химического состава, но и с нестабильностью тонкости помола и морфологией частиц [18].

В настоящее время установлено, что тонкость помола шлака является определяющей характеристикой, а также рассчитан оптимальный диапазон тонкости помола шлаков (по показателю удельной поверхности), составляющий от 3500 см²/г до 4100 см²/г [19–21]. Добиться заданной тонкости помола возможно благодаря современному помольному оборудованию и применению, в случае необходимости, интенсификаторов помола. Необходимо отметить, что ещё ГОСТ 10178–85 содержал требование, согласно которому удельная поверхность портландцемента с добавкой шлака для бетона дорожных и аэродромных покрытий должна составлять не менее 280 м²/кг, в действующем ГОСТ Р 55224–2020 этот параметр ограничен диапазоном 280–400 м²/кг.

Накопленные результаты научных исследований и практического опыта однозначно указывают на то, что цементы с добавлением шлака до 15 % характеризуются высокой коррозионной стойкостью по отношению к действию противогололедных реагентов.

С учетом изложенного требования ГОСТ 17608 и ГОСТ 6665 по использованию цементов с содержанием шлака до 5 % не являются обоснованными. Для установления допустимого оптимального содержания шлака в составе цемента для изготовления

Таблица 1

**Анализ требований нормативных документов к процентному содержанию шлака в составах
портландцементов и бетонов**

Нормативный документ	Требование	Комментарии
СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85»	Морозостойкость бетона как определяющий фактор надежной эксплуатации тротуарных плит и бортового камня должна обеспечиваться мерами первичной защиты. Соответственно, применение бетонов, стойких к воздействию агрессивной среды и отрицательным температурам, обеспечивается выбором цемента. В качестве вяжущих для приготовления бетонов следует использовать ПЦ, ПЦ с МД, ШПЦ	Требование по ограничению применения цемента со шлаком не содержится. НД содержит требование о необходимости проводить испытания, подтверждающие возможность применения цемента с содержанием шлака до 20 %
ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия»	Цементы, соответствующие требованиям ГОСТ 10178, ГОСТ 22266, ГОСТ 31108, ГОСТ 33174 (в РФ также действует ГОСТ Р 55224-2020 «Цементы для транспортного строительства. Технические условия»). В агрессивных условиях эксплуатации изделий и конструкций вид цемента следует выбирать по ГОСТ 31384. В качестве вяжущего для бетона покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов следует применять ПЦ на основе клинкера нормированного минералогического состава по ГОСТ 10178, цемент — по ГОСТ 33174	
ГОСТ 31384-2017 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования»	В зависимости от агрессивного воздействия среды следует применять ПЦ, ПЦ с МД, ШПЦ по ГОСТ 10178, ГОСТ 30515, ГОСТ 31108	
ГОСТ 6665-91 «Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия»	Бездобавочный ПЦ, ПЦ с МД до 5 % или ПЦ для бетонов дорожных и аэродромных покрытий, содержащий в цементном клинкере C_3A не более 8 %, соответствующие ГОСТ 10178	НД содержит ограничение по содержанию МД (до 5 %) в ПЦ
ГОСТ 21924.0-84 «Плиты железобетонные для покрытий городских дорог. Технические условия»	Плиты изготавливают из тяжелого бетона, удовлетворяющего требованиям ГОСТ 26633. Для приготовления бетона следует применять ПЦ по ГОСТ 10178-85 с дополнительными требованиями для бетона дорожных покрытий	НД не ограничивает применение в составе цемента МД
ГОСТ 32961-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Камни бортовые. Технические требования»	Искусственные бортовые камни изготавливают из конструкционных бетонов по ГОСТ 26633	
ГОСТ 33148-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Плиты дорожные железобетонные. Технические требования»	Плиты изготавливают из тяжелых конструкционных цементных бетонов по ГОСТ 26633. Применяют ПЦ по ГОСТ 33174 без минеральных добавок, с содержанием трехкальциевого алюмината C_3A не более 8 % по массе	НД запрещает применение в составе цемента любых МД

Нормативный документ	Требование	Комментарии
ГОСТ 17608-2017 «Плиты бетонные тротуарные. Технические условия»	ПЦ на клинкере нормированного состава без МД и с МД доменного гранулированного шлака до 5 %, ПЦ для дорожных и аэродромных покрытий, содержащие в цементном клинкере трехкальциевого алюмината C_3A не более 7 %, отвечающие требованиям ГОСТ 10178, ГОСТ 31108, ГОСТ 33174	НД содержит конкретное ограничение по содержанию в цементе доменного гранулированного шлака (не более 5 %)
ОДМ 218.3.081-2016 «Методические рекомендации по подбору составов цементобетонов для дорожного строительства в различных климатических зонах и с учетом эксплуатационных условий работы дорожных покрытий»	ПЦ, ПЦ с МД по ГОСТ Р 55224, ГОСТ 33174, ГОСТ 26633. Рекомендуются использовать ПЦ нормированного состава с содержанием трехкальциевого алюмината C_3A не более 7 %. В качестве основного компонента применяют только добавку доменного гранулированного шлака по ГОСТ 3476	Ограничение по содержанию шлака в цементе отсутствует. Коррозионную стойкость бетона требуется подтверждать испытаниями
ГОСТ Р 55224-2020 «Цементы для транспортного строительства. Технические условия»	НД позволяет применять для бетонов аэродромных покрытий и для железобетонных изделий и мостовых конструкций цементы с содержанием доменного гранулированного шлака по ГОСТ 3476 не более 15 % суммарной массы основных компонентов	НД содержит ограничение по содержанию доменного шлака в цементе (не более 15 %)

Примечания: МД — минеральная добавка; ШПЦ — шлакопортландцемент; кроме ГОСТ 33174 в РФ действует также ГОСТ Р 55224-2020 «Цементы для транспортного строительства. Технические условия»; согласно положениям СП 28.13330 и ГОСТ 31384 обоснованность применения цемента типа ЦЕМ II/A-III (цементы со шлаком до 20 %) при эксплуатации в среде «замораживание — оттаивание» требуется подтвердить испытанием (см. табл. Д.1 СП 28.13330 и табл. Д.3 ГОСТ 31384-2017); в настоящее время действие ГОСТ 10178-85 отменено в связи с принятием ГОСТ 31108-2020; ОДМ 218.3.081-2016 в настоящее время признан утратившим силу в соответствии с распоряжением Росавтодора (Федерального дорожного агентства) от 05.05.2022 № 1414-р; при действии на насыщенный растворами солей бетон циклического замораживания и оттаивания агрессивная среда (антиобледенители) классифицируется как XF4.

Таблица 2

Характеристика применяемого портландцемента

№ п/п	Показатель	Значение
1	Содержание минеральной добавки (гранулированный шлак), %	15
2	Удельная поверхность, $см^2/г$	4000
3	Прочность на сжатие в возрасте 2 сут, МПа	26,2
4	Прочность на сжатие в возрасте 28 сут, МПа	55,8
5	Содержание частиц размером менее 5 мкм, %	18,8
6	Содержание частиц размером 5–32 мкм, %	69,2
7	Содержание частиц размером более 32 мкм, %	12,0
8	Массовая доля щелочных оксидов в пересчете на Na_2O , %	0,63
9	Содержание трехкальциевого алюмината C_3A , %	7

изделий, используемых при дорожном строительстве, на нескольких заводах были выпущены опытные партии тротуарной плитки. При изготовлении продукции во всех случаях применялся цемент со шлаком одно-

го завода-изготовителя, показатели его качества представлены в табл. 2.

При проектировании расхода сырьевых компонентов учитывался факт замещения портландцементной клинкерной составля-

ющей гранулированным шлаком в количестве 15 % (по массе). Для проведения сравнительных испытаний базовым составом в каждом случае использовался расход компонентов, который был принят и апробирован на конкретном заводе-изготовителе. Так как известно, что гранулированный шлак обладает меньшей гидравлической активностью (в сравнении с «чистым» клинкером), то для обеспечения кинетики набора прочности бетона изделий в отпускном и проектном возрасте расход цемента с гранулированным шлаком был увеличен на 5–10 %. При этом состав также корректировался в части пропорционального снижения количества заполнителей.

Так, базовым расходом цемента ЦЕМ I 42,5Н для выпуска тротуарной плитки двухслойного вибропрессования принято 390 кг/м³ и 430 кг/м³ соответственно для нижнего и верхнего слоя. При применении ЦЕМ II/A-III расход составил 410 кг/м³ (для нижнего слоя) и 475 кг/м³ (для верхнего слоя). С учетом того, что в составе ЦЕМ II/A-III 15 % гранулированного шлака, то в пересчете на массу чистого портландцементного клинкера его доля сократилась с 390 кг/м³ до 356,5 кг/м³ в первом случае и с 430 кг/м³ до 413 кг/м³ во втором случае.

Выпуск опытных партий продукции показал, что при использовании цемента со шлаком не требуется перенастройка технологических операций на заводах. Во всех случаях (при сравнении базовых и исследуемых составов) технологические свойства бетонной смеси сохранились на заданном уровне. Также определено, что качество лицевой и боковой поверхностей улучшилось.

При использовании цемента со шлаком водопотребность бетонных смесей не претерпела изменений.

Результаты определения показателей качества готовых изделий (рисунок) однозначно подтвердили, что применение шлака в со-

ставе цемента не влечет за собой снижение эксплуатационно-технических характеристик.

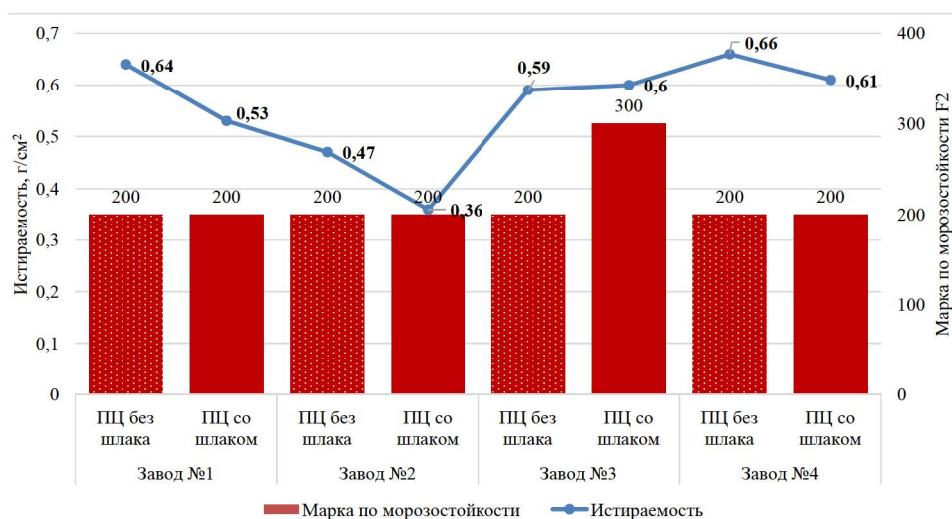
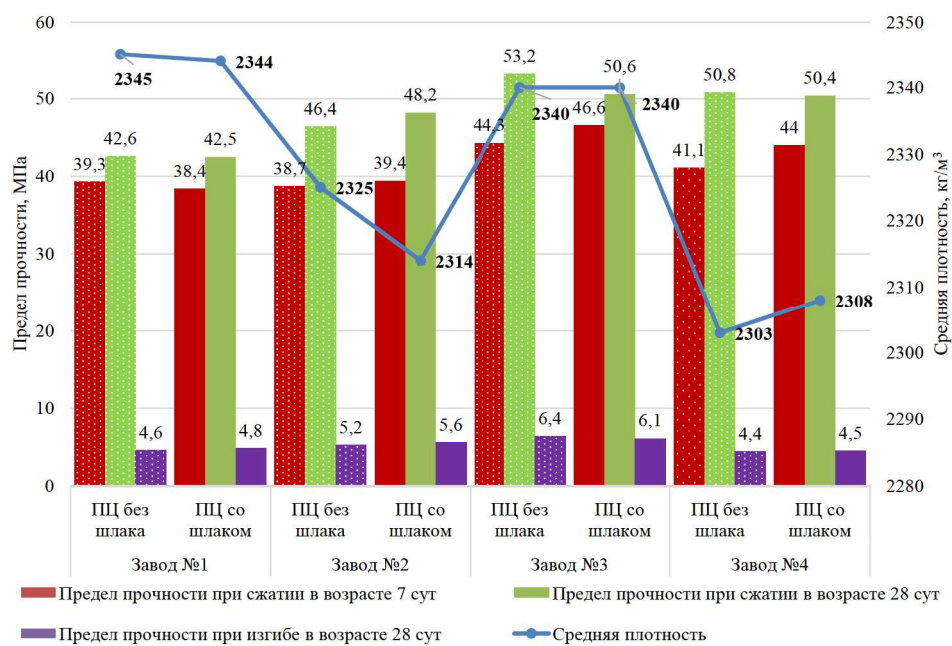
Гранулированный шлак в процессе твердения цемента одновременно играет роль микрозаполнителя, что обеспечивает увеличение контактов твердых частиц, снижение пористости бетона и активной минеральной добавки, а это приводит к росту объема химически стойких и стабильных кристаллогидратов за счет связывания портландита, к формированию более плотной структуры, снижению усадочных деформаций, соответственно, увеличивается долговечность бетона.

Результаты проведенных исследований показали, что замещение части чистого портландцементного клинкера молотым гранулированным шлаком до 15 % позволяет осуществлять выпуск вибропрессованных изделий без ухудшения их физико-механических показателей с одновременным экономическим эффектом, в том числе и за счет снижения доли брака. Отмечен рост предела прочности при изгибе и при сжатии в проектном возрасте (при незначительном замедлении динамики набора прочности на ранних стадиях твердения), сопротивления истирающим воздействиям.

Выводы

Анализ научных источников и приведенные в данной статье результаты испытаний подтверждают возможность применения для изготовления вибропрессованных изделий (тротуарной плитки и бортового камня) портландцемента, содержащего в своем составе гранулированный шлак в количестве 15 % по массе.

Также определена необходимость внесения изменений в соответствующую нормативную документацию, предусматривающих увеличение предельного содержания шлаков в цементном вяжущем для изготовления дорожных изделий.



Показатель качества	Завод №1		Завод №2		Завод №3		Завод №4	
	ПЦ без шлака	ПЦ со шлаком	ПЦ без шлака	ПЦ со шлаком	ПЦ без шлака	ПЦ со шлаком	ПЦ без шлака	ПЦ со шлаком
Средняя плотность, кг/м³	2345	2344	2325	2314	2340	2340	2303	2308
Предел прочности при сжатии в возрасте 7 сут, МПа	39,3	38,4	38,7	39,4	44,3	46,6	41,1	44,0
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут, МПа	42,6	42,5	46,4	48,2	53,2	50,6	50,8	50,4
Предел прочности при изгибе в возрасте 28 сут, МПа	4,6	4,8	5,2	5,6	6,4	6,1	4,4	4,5
Истираемость, г/см²	0,64	0,53	0,47	0,36	0,59	0,60	0,66	0,61
Марка по морозостойкости	F ₂₀₀	F ₂₀₀	F ₂₀₀	F ₂₀₀	F ₂₀₀	F ₃₀₀	F ₂₀₀	F ₂₀₀

Показатели качества бетона изделий

Благодарности

Автор выражает благодарность за поддержку и помощь в проведении исследований всем специалистам отрасли, в особенности Мошковой С. В., Любомировой Е. Е., коллективу производственного филиала компании «ВЫБОР» (пос. Богатищево, Московская обл.), коллективу завода по производству тротуарной плитки и элементов благоустройства «БРАЕР» (г. Тула), коллективу завода по производству элементов мощения «Штайнгот» (г. Лобня, Московская обл.), коллективу завода тротуарной плитки «ЗЕНИТ ЧЕРНОЗЕМЬЕ» (г. Воронеж).

Библиографический список

1. Башмаков И. А., Потапов Е. Н., Борисов К. Б., Лебедев О. В., Гусева Т. В. Декарбанизация цементной отрасли и развитие систем экологического и энергетического менеджмента // *Строительные материалы*. 2023. № 9 (817). С. 4–12.
2. Муравьева Е. А., Кулакова Е. С. Углеродный след предприятий по производству цемента // *SOCAR Proceedings*. 2022. Special Issue 2. Pp. 053–063.
3. Овчинников К. Н. Карбоновый след мировой цементной промышленности. Факторы влияния, тренды и потенциал по снижению // *Недропользование XXI век*. 2022. № 4 (96). С. 127–137.
4. Kajaste R., Hurme M. Cement industry greenhouse gas emissions — management options and abatement cost // *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112. Pp. 4041–4052.
5. Humbert P., Castro-Gomes J., Savastano H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: optimal conditions and potential applications // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 210. Pp. 413–421.
6. Баженов П. И. Комплексное использование минерального сырья и экология. М.: АСВ, 1994. 266 с.
7. Трофимов Б. Я. Регулирование морозостойкости бетона на шлакопортландцементе // *Популярное бетоноведение*. 2009. № 5. С. 34–44.
8. Суровцов М. М., Хамидулина Д. Д., Некрасова С. А., Морева Ю. А. Использование молотого доменного гранулированного шлака в цементном вяжущем // *Строительные материалы*. 2023. № 7. С. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48>.
9. Воронин К. М., Хамидулина Д. Д., Некрасова С. А., Трубкин И. С. Вибропрессованные элементы мощения с использованием сталеплавильных шлаков // *Строительные материалы*. 2017. № 12. С. 71–73.
10. Фельдраппе Ф., Эренберг А. Разработка новых цементов типа СЕМ X на основе молотого гранулированного доменного шлака, золы-уноса и портландцементного клинкера // *Цемент и его применение*. 2014. № 4. С. 34–39.
11. Глуховский В. Д. Шлакощелочные бетоны на мелкозернистых заполнителях. Киев: Вища школа, 1981. 224 с.
12. Кривенко П. В., Скурчинская Ж. В. Эффективные пути совершенствования свойств шлакощелочных вяжущих // *Цемент*. 1990. № 6. С. 17–21.
13. Бутт Ю. М. Технология цемента и других вяжущих материалов. М., 1964. 352 с.
14. Ратинов В. Б., Шестопёров С. В., Крыжановский И. И., Розенталь Н. К. Защитные свойства бетона на шлакопортландцементе // *Бетон и железобетон*. 1974. № 8. С. 38–40.
15. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные материалы из отходов промышленности. Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. 368 с.
16. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Строительные минеральные вяжущие материалы. М.: Инфраинженерия, 2011. 544 с.
17. Трофимов Б. Я., Крамар Л. Я., Шульдиков К. В. Влияние количества шлака в цементе на морозостойкость тяжелого бетона // *Строительные материалы*. 2013. № 9. С. 96–101.
18. Коровкин М. О., Короткова А. А., Ерошкина Н. А., Саженко С. М. Влияние доменного гранулированного шлака на свойства мелкозернистого самоуплотняющегося бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2021. Т. 8, № 80. С. 486–494.
19. Малахин С. С., Кривобородов Ю. Р. Влияние дисперсности шлака на свойства портландцемента // *Успехи в химии и химической технологии*. Т. XXXII. 2018. № 2. С. 114–116.
20. Калиновская Н. Н., Аль-Мусави К. С., Кузнецов Д. В. О возможности применения молотого доменного гранулированного шлака ПАО «Северсталь» в цементных системах // *Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Вып. 12 / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. Минск, 2020. С. 120–130.*
21. Должников П. Н., Семирягин С. В., Фурдей П. Г. Исследование влияния дисперсности гранулированного доменного шлака на прочность цемента. URL: <http://sbornik.dstu.education/articles/RU/101.pdf> (дата обращения: 04.10.2023).

References

1. Bashmakov I. A., et al. *Dekarbonizatsiya tsementnoy otrasli i razvitie sistem ekologicheskogo i energeticheskogo menedzhmenta* [Decarbonization of cement industry and development of environmental and energy management systems]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2023, no. 9 (817), pp. 4–12.
2. Murav'eva E. A., Kulakova E. S. *Uglerodniy sled predpriyatiy po proizvodstvu tsementa* [Carbon footprint of cement production enterprises]. *SOCAR Proceedings*, 2022, Special Issue 2, pp. 053–063.
3. Ovchinnikov K. N. *Karbonoviy sled mirovoy tsementnoy promyshlennosti. Faktory vliyaniya, trendy i potentsial po snizheniyu* [Carbon Footprint of the World Cement Industry. Factors of influence, trends and potential for reduction]. *Nedropol'zovanie XXI vek – Subsoil Use XXI Century*, 2022, no. 4 (96), pp. 127–137.
4. Kajaste R., Hurme M. Cement industry greenhouse gas emissions — management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 112, pp. 4041–4052.
5. Humbert P., Castro-Gomes J., Savastano H. Clinker-free CO₂ cured steel slag based binder: optimal conditions and potential applications. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 210, pp. 413–421.
6. Bazhenov P. I. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya i ekologiya* [Complex utilization of mineral raw materials and ecology]. Moscow, Assotsiatsiya str. vuzov Publ., 1994, 266 p.
7. Trofimov B. Ya. *Regulirovanie morozostoykosti betona na shlakoportlandtsemente* [Regulation of frost resistance of concrete on slag-portland cement]. *Populyarnoe betonovedenie – Popular Concrete Science*, 2009, no. 5, pp. 34–44.
8. Surovtsov M. M., Khamidulina D. D., Nekrasova S. A., Moreva Yu. A. *Ispol'zovanie molotogo domennogo granulirovannogo shlaka v tsementnom vyazhushchem* [Utilization of ground blast-furnace granulated slag in cement binder]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2023, no. 7, pp. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-815-7-43-48>.
9. Voronin K. M., Khamidulina D. D., Nekrasova S. A., Trubkin I. S. *Vibropressovannyye elementy moshcheniya s ispol'zovaniem staleplavil'nykh shlakov* [Vibro-pressed paving elements using steelmaking slag]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2017, no. 12, pp. 71–73.
10. Fel'drappe F., Erenberg A. *Razrabotka novykh tsementov tipa CEM X na osnove molotogo granulirovannogo domennogo shlaka, zoly-unosa i portlandtsementnogo klinkera* [Development of new CEM X type cements based on ground granulated blast furnace slag, fly ash and Portland cement clinker]. *Tsement i ego primenenie – Cement and its Application*, 2014, no. 4, pp. 34–39.
11. Glukhovskiy V. D. *Shlakoshchelochnye betony na melkozernistykh zapolnitelyakh* [Slag-alkali concretes on fine-grained aggregates]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1981, 224 p.
12. Krivenko P. V., Skurchinskaya Zh. V. *Effektivnye puti sovershenstvovaniya svoystv shlakoshchelochnykh vyazhushchikh* [Effective ways of improving the properties of slag-alkali binders]. *Tsement – Cement*, 1990, no. 6, pp. 17–21.
13. Butt Yu. M. *Tekhnologiya tsementa i drugikh vyazhushchikh materialov* [Technology of cement and other binding materials]. Moscow, 1964, 352 p.
14. Ratinov V. B., Shestoporov S. V., Kryzhanovskiy I. I., Rozental' N. K. *Zashchitnye svoystva betona na shlakoportlandtsemente* [Protection properties of concrete on slag-Portland cement]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and Reinforced Concrete*, 1974, no. 8, pp. 38–40.
15. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L. *Stroitel'nye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Building materials from industrial waste]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2007, 368 p.
16. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L. *Stroitel'nye mineral'nye vyazhushchie materialy* [Construction mineral binding materials]. Moscow, Infra-inzheneriya Publ., 2011, 544 p.
17. Trofimov B. Ya., Kramar L. Ya., Shuldyakov K. V. *Vliyanie kolichestva shlaka v tsemente na morozostoykost' tyazhelogo betona* [Influence of the amount of slag in cement on the frost resistance of heavy concrete]. *Stroitel'nye materialy – Building Materials*, 2013, no. 9, pp. 96–101.
18. Korovkin M. O., Korotkova A. A., Eroshkina N. A., Sadenko S. M. *Vliyanie domennogo granulirovannogo shlaka na svoystva melkozernistogo samouplotnyayushchegosya betona* [Impact of blast-furnace granulated slag on the properties of fine-grained self-compacting concrete]. *Inzhenerniy vestnik Dona – Engineering Bulletin of Don*, 2021, vol. 8, no. 80, pp. 486–494.
19. Malakhin S. S., Krivoborodov Yu. R. *Vliyanie dispersnosti shlaka na svoystva portlandtsementa* [Influence of slag dispersion rate on the properties of Portland cement]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii – Chemistry Technology Advances*, vol. XXXII, 2018, no. 2, pp. 114–116.
20. Kalinovskaya N. N., Al'-Musavi K. S., Kuznetsov D. V. *O vozmozhnosti primeneniya molotogo domennogo granulirovannogo shlaka PAO «Severstal» v tsementnykh sistemakh* [On the possibility of using ground blast-furnace granulated slag of PJSC “Severstal” in cement systems]. *Sb. nauch. tr. «Problemy sovremennogo betona i*

zhelezobetona». Vyp. 12 [Collection of scientific articles “Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete”. Iss. 12]. Minsk, BelNIIS Publ., 2020, pp. 120–130.

21. Dolzhnikov P. N., Semiryagin S. V., Furdey P. G. *Issledovanie vliyaniya dispersnosti granulirovannogo*

domennogo shlaka na prochnost' tsementa [Investigation of the influence of dispersion rate of granulated blast-furnace slag on the strength of cement]. Available at: <http://sbornik.dstu.education/articles/RU/101.pdf> (accessed: 04.10.2023).