

Строительные материалы и изделия Building materials and products

Научная статья

УДК 666.952.1 + 666.943.1 + 691.32

DOI: 10.14529/build240304

ЦЕМЕНТЫ И БЕТОНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОЛОТОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА

И.М. Иванов^{1,2}, ivanov.im@bk.ru, Ilyalvanov@mechel.ru

Л.Я. Крамар¹, kramarli@susu.ru

М.В. Мордовцева¹, mariamordovtseva@mail.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² ООО «Мечел-Материалы», Челябинск, Россия

Аннотация. Отечественная цементная промышленность с каждым годом увеличивает долю выпуска портландцемента без минеральных добавок, снижая потребление гранулированного доменного шлака. Такие рыночные условия сподвигли появление в России относительно нового продукта – молотого гранулированного доменного шлака, поставляемого сразу потребителям портландцемента, которые применяют такой продукт в качестве компонента цемента в области строительства и инженерной защиты территорий от природных и техногенных процессов. Основным изготовителем такого материала в России – ООО «Мечел-Материалы» (Челябинск), занимающее лидирующие позиции по объёму и качеству. Это предприятие осуществляет контроль качества на всех этапах производства продукта: при приёмке огненно-жидкого доменного шлака, его грануляции и тонкого помола. Поэтому такой продукт обладает высоким и стабильным качеством. В статье приведена краткая информация о технологии производства молотого гранулированного доменного шлака на этом предприятии и стандарте организации на этот продукт. По результатам литературного обзора установлено, что молотый гранулированный доменный шлак даёт цементам и бетонам ряд важных преимуществ. Однако информация о влиянии граншлака на некоторые другие важные характеристики цементов и бетонов в литературе ограничена. Ещё более ограничена информация о влиянии отдельно молотого гранулированного доменного шлака, особенно отечественного. В связи с этим было проведено исследование влияния соотношения в цементе молотого гранулированного доменного шлака и портландцемента на основные строительные-технические свойства получаемых цементов и бетонов. Все испытания проведены по действующим национальным стандартам России. Проведён анализ результатов испытаний и сделано заключение о том, что исследуемый молотый гранулированный доменный шлак позволяет получать цементы и бетоны с улучшенными значениями многих показателей качества, существенно увеличенной долговечностью, значительной экономией и большим вкладом в экоустойчивое развитие страны.

Ключевые слова: молотый гранулированный доменный шлак (МГДШ), цемент, нормальная плотность (водопотребность), сроки схватывания, тепловыделение, активность, сульфатостойкость, бетон, прочность, модуль упругости, морозостойкость, эффективность, долговечность

Для цитирования. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Мордовцева М.В. Цементы и бетоны с использованием молотого гранулированного доменного шлака // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 3. С. 33–48. DOI: 10.14529/build240304

CEMENTS AND CONCRETES USING GROUND GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG

I.M. Ivanov^{1,2}, *ivanov.im@bk.ru*, *Ilyalvanov@mechel.ru*

*L.Ya. Kramar*¹, *kramarli@susu.ru*

*M.V. Mordovtseva*¹, *mariamordovtseva@mail.ru*

¹ *South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

² *LLC "Mechel-Materials", Chelyabinsk, Russia*

Abstract. The Russian cement industry is increasing the share of Portland cement production without mineral additives every year, reducing the consumption of granulated blast-furnace slag. This prompted the emergence of a relatively new product – ground granulated blast-furnace slag (GGBS), supplied directly to consumers of Portland cement, who use it as a component of cement in construction and engineering. The main manufacturer in Russia is Mechel-Materials LLC (Chelyabinsk). This enterprise conducts quality control at all stages of production: when receiving liquid blast-furnace slag, its granulation, and its fine grinding. The article provides information about the production technology of GGBS at this enterprise. Based on a literature review, it was established that GGBS gives cements and concretes several important advantages. However, studies of the influence of granulated slag on other important characteristics of cements and concretes are limited in the literature. Information on the influence of separately ground domestic granulated blast-furnace slag is even more limited. In this regard, a study was carried out on the influence of the ratio of GGBS and Portland cement on the construction and technical properties of the resulting cements and concretes. All tests were carried out in accordance with the current Russian standards. The test results show that the GGBS under study makes it possible to obtain cements and concretes with improved quality indicators: durability, cost, and environmentally sustainable development.

Keywords: ground granulated blast-furnace slag (GGBS), cement, standard consistency, times of setting, heat of hydration, cement activity, sulfate resistance, concrete, strength, modulus of elasticity, frost-resistance, efficiency, durability

For citation. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Mordovtseva M.V. Cements and concretes using ground granulated blast-furnace slag. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture.* 2024;24(3):33–48. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240304

Введение

Получение эффективных цементов и бетонов, экологически и экономически выгодных и по умолчанию соответствующих всем требованиям к показателям качества, долговечности и безопасности, всегда было и будет приоритетной задачей развития строительной отрасли. Поэтому изучение возможностей применения вторичного сырья и продуктов на его основе остаётся актуальным направлением исследований. Наиболее перспективным для применения в цементах и бетонах является доменный шлак, так как он образуется в большом количестве, имеет относительно стабильный химический состав, после грануляции и тонкого помола проявляет достаточную активность совместно с портландцементом, имеет невысокую стоимость и даёт цементам и бетонам много важных технологических и эксплуатационных преимуществ.

В СССР было проведено множество глубоких исследований о влиянии граншлака на свойства цементов и бетонов [1, 2], на основе чего государственным стандартом был введён шлакопортландцемент, который активно использовался во всех республиках бывшего Союза. Однако после распада СССР в России с каждым годом сокращался

выпуск цементов со шлаком, особенно шлакопортландцемента. Собственниками цементных заводов стали частные лица, а государство практически перестало регулировать их деятельность, поэтому многие цементные заводы стали производить портландцемент без минеральных добавок (ПЩ), делая ставку на выпуск продукта высокого передела, с высокой добавленной стоимостью, что выгодно только лицам, получающим прибыль с цементных заводов.

В связи с падением потребления цементными заводами гранулированного доменного шлака некоторые металлургические предприятия стали выпускать молотый гранулированный доменный шлак (МГДШ) и поставлять его сразу на заводы по производству товарного бетона и сборного железобетона. Применение МГДШ заключается в его совместном использовании с ПЩ без минеральных добавок. Недостаток такой технологии один – необходимость наличия у потребителя не менее двух систем хранения и подачи цемента, одну из которых используют под ПЩ, а другую – под МГДШ. Но преимуществ от этого больше, главные из них:

– возможность получения и применения МГДШ с оптимальной удельной поверхностью за счёт отдельного помола;

– возможность использования цемента с наиболее эффективным соотношением ПЦ и МГДШ в каждом составе бетона;

– получение бетонных смесей и бетонов с существенными преимуществами, главные из которых раскрыты в настоящей работе.

Таким образом, технология применения доменного шлака в строительной отрасли постепенно трансформируется. Это требует тщательного изучения влияния молотого гранулированного доменного шлака на основные свойства цементов и бетонов.

1. Производство МГДШ в России

ООО «Мечел-Материалы» (Челябинск) 10 лет назад первым в России запустило производство молотого гранулированного доменного шлака. Только в последние несколько лет появились другие изготовители аналогичного материала: ОАО «ЦЕСЛА», г. Сланцы; ПАО «НЛМК», г. Липецк; ООО «Главимпортцемент», г. Шахты; ООО «МЦОЗ», г. Магнитогорск.

Отличительными особенностями МГДШ производства «Мечел-Материалы» являются: высокая тонкость помола (удельная поверхность по стандарту не менее 480 м²/кг), недостижимая другими изготовителями; стабильный и особенный химический состав, относящий данный шлак к кислороду, что делает его заменителем такой активной минеральной добавки, как микрокремнезём, даже при получении высокофункциональных бетонов. Практически все перечисленные предприятия выпускают МГДШ в небольших объемах и с ограниченным плечом поставки. «Мечел-Материалы» способно бесперебойно производить и поставлять МГДШ в количестве до миллиона тонн в год, а налаженный логистический комплекс с перевалками по стране сегодня позволяет поставлять продукт как до Санкт-Петербурга, так и до Новосибирска.

При производстве чугуна на ПАО «ЧМК» (входит в группу «Мечел») в доменных печах образуется доменный шлак в виде огненно-жидкого расплава неметаллической части металлошихты (агломерат, окатыши, руда), флюсов (известняк) и золы от сгорания топлива (каменноугольный кокс). Виды и содержание флюсов определяют по составу пустой породы металлошихты и золы от сгорания топлива, добиваясь максимального их связывания и образования расплава со строго определёнными свойствами. Для формирования расплава при установленной температуре, обеспечения его требуемой вязкости и других условий (чтобы шлак полностью отделился от металла) в доменную печь подают шихту сбалансированного состава, что обеспечивает доменному шлаку стабильный химический состав. Кроме того, на производстве регулярно контролируется химический состав огненно-жидкого шлака, в случае отклонения химического состава шлак отправляется в от-

вал для дальнейшей переработки в доменный щербень. Прошедший приёмку огненно-жидкий расплав доменного шлака поступает в цех грануляции, оснащённый гидрожелобными агрегатами, позволяющими выпускать гранулированный доменный шлак полусухим способом производства. На этих агрегатах расплав шлака быстро охлаждается высоконапорными струями воды. В результате шлак разбивается на мелкие гранулы, а за счёт резкого охлаждения шлак не успевает сформировать кристаллическую структуру, его фазовый состав практически полностью становится стекловидным. Содержание стеклофазы – главный показатель качества на этом этапе производства, так как только стеклофаза шлака способна проявлять гидравлическую активность в составе цемента. Полученный гранулированный доменный шлак отправляется на помольно-смесительный участок, оснащённый двумя вертикальными валковыми мельницами LOESCHE LM 53.3+3 CS (диаметр помольного стола 5,3 м, 3 основных вала + 3 вспомогательных вала, специализирована для помола клинкера и шлака). Каждая мельница позволяет выпускать 100 т/ч молотого гранулированного доменного шлака с высокой тонкостью помола. Продукт выпускается с удельной поверхностью 500 ± 20 м²/кг, которая установлена по результатам внутренних исследований предприятия и является оптимальной для применимого оборудования и сырья.

Выпускаемый МГДШ выглядит как тонкодисперсный порошок белого цвета. Помольно-смесительный участок оборудован полноценным отгрузочным терминалом для отгрузки продукта любым сухопутным транспортом. Технология транспортирования, хранения и применения МГДШ такая же, как и для ПЦ. При соблюдении условий транспортирования и хранения продукт не склонен к слеживанию и окомкованию в течение нескольких лет.

«Мечел-Материалы» выпускает МГДШ по стандарту организации СТО 99126491–22–2023 «Шлак доменный гранулированный молотый. Технические условия», который учитывает и гармонизирует требования российских и европейских стандартов, применимых к такой активной минеральной добавке.

1.1. Сведения о влиянии МГДШ на свойства цементов и бетонов

Результатами исследований и практикой сегодня доказано, что бетоны на цементе, содержащих молотый гранулированный доменный шлак в количестве от 20 до 60 %, перед бетонами на портландцементе без минеральных добавок имеют существенные экономические [3], экологические [4], технологические и эксплуатационные преимущества:

– сниженную склонность бетонных смесей к расслоению и водоотделению [5], а также повы-

шенную удобоукладываемость и её сохраняемость [6], поэтому МГДШ эффективен в производстве самоуплотняющихся бетонов [7];

- повышенную прочность на сжатие в возрасте более 28 суток [8, 9];

- повышенную прочность на растяжение при изгибе [10], улучшенные показатели трещиностойкости [11], ударопрочности [12] и усталостной прочности (выносливости) [13];

- повышенную стойкость к истиранию [14];

- повышенную термическую стойкость (огнестойкость) [15, 16];

- повышенную защиту от коррозии стальной арматуры в бетоне за счёт ингибирования проникновения ионов хлора и йода [17–19];

- повышенную эффективность использования переработанных заполнителей и коррозионную стойкость бетонов с их применением в основном за счёт упрочнения контактной зоны между цементным камнем и заполнителями, а также материалов с отклонением от требований стандартов [20, 21];

- сниженную аутогенную усадку и растрескивание на начальных этапах твердения, особенно высокофункциональных бетонов с низким водоцементным отношением [22];

- повышенный потенциал аутогенного заживления (самозалечивания) структуры за счёт неполной гидратации шлаковой составляющей цемента в поздние сроки твердения [[23];

- незначительно повышенную общую пористость в раннем возрасте, но существенно сниженную в возрасте более 28 суток [24];

- повышенную морозостойкость современных бетонов с водоредуцированием поликарбоксилатным суперпластификатором [25];

- повышенную газо- и водонепроницаемость [26] за счёт снижения проницаемости структуры цементного камня [27];

- многократно сниженный риск возникновения многих видов внутренней коррозии бетона, в том числе щелочной [28, 29];

- многократно повышенную сульфатостойкость, стойкость к морской воде, хлоридам антиобледенителей и карбонизации [27, 30], а также стойкость к воздействию органических кислот [31].

Многие из вышепредставленных эксплуатационных преимуществ бетонов с МГДШ обусловлены формированием особенной структуры цементного камня. МГДШ связывает самый слабый продукт гидратации портландцемента $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в прочные и стойкие гидросиликаты кальция, способствуя формированию в цементном камне в основном низкоосновных гидросиликатов кальция С-S-N (I), которые, в отличие от высокоосновных гидросиликатов кальция С-S-N (II) – главных продуктов гидратации портландцемента, обладают повышенной прочностью и стойкостью ко многим видам агрессивного воздействия окружающей сре-

ды [32, 33]. Следовательно, молотый гранулированный доменный шлак способствует существенному увеличению долговечности бетона практически во всех средах эксплуатации.

Однако в литературе ограничена информация о влиянии МГДШ на некоторые другие важные свойства цемента и бетонов, а также нет сведений о влиянии молотого гранулированного доменного шлака, выпускаемого в России, на нормируемые национальными стандартами строительно-технические свойства цемента и бетонов.

1.2. Цель и задачи

Цель работы – изучение влияния МГДШ производства «Мечел-Материалы» на главные свойства общестроительных цемента и бетонов с определением характеристик по национальным стандартам.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- получить цементы с различным содержанием МГДШ и определить для каждого из них: нормальную плотность, сроки схватывания, равномерность изменения объёма, тепловыделение, активность (по двум стандартам) и сульфатостойкость;

- подобрать единый состав бетона и на нём провести исследование влияния содержания МГДШ в цементе на основные свойства бетонов: кубиковую и призмную прочность на сжатие, прочности на растяжение при изгибе и раскалывании, модуль упругости и коэффициент Пуассона, а также морозостойкость;

- обработать результаты испытаний, сделать заключение и дать рекомендации по применению МГДШ с извлечением из него наибольшей эффективности для получаемых цемента и бетонов.

2. Материалы и методы

Все испытания проводили на цементах с содержанием МГДШ от 0 до 100 % (по массе), с шагом 20 %. Цементы получали смешиванием портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н, соответствующего ГОСТ 31108–2020, и молотого гранулированного доменного шлака, соответствующего СТО 99126491–22–2023.

В качестве заполнителей для получения образцов тяжёлых бетонов применяли: крупный заполнитель – гранодиоритовый щебень фракции 3–10 мм Новосмолинского карьера, соответствующий ГОСТ 8267–93; мелкий заполнитель – кварцевый песок месторождения Хлебоборб-2, соответствующий ГОСТ 8736–2014.

Исследование влияния содержания МГДШ в цементе на свойства бетонов проводили на составах, имеющих следующие параметры:

- расход цемента, включая МГДШ, – 500 кг/м³;

- водоцементное отношение (В/Ц) – 0,340;

- дозировка суперпластификатора – 0,85 %;

- доля мелкого заполнителя в заполнителях по объёму – 0,440.

Эти параметры вместе с варьируемым содержанием МГДШ в цементе задают составы бетонов. Расход цемента принят повышенный, чтобы лучше проявить влияние шлака. Остальные параметры подобраны экспериментально, с условием обеспечения подвижности бетонных смесей в рамках заданной марки ПЗ, без признаков водоотделения, расслоения и повышенной вязкости при перемешивании.

Для определения кубиковой прочности бетонов на сжатие изготавливали образцы-кубы с ребром 100 мм, а для определения прочности на растяжение при изгибе и раскалывании, призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона – образцы-призмы с размерами 100×100×400 мм. Все эти характеристики определяли в возрасте 28 суток. Кубиковую прочность на сжатие дополнительно контролировали в возрасте 2 и 7 суток. Все образцы до момента испытания твердели в нормальных условиях: при температуре окружающего воздуха $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и его относительной влажности $95 \pm 5\%$.

Все другие условия проведения испытаний установлены национальными стандартами. На всех рисунках с результатами испытаний (рис. 1–10) отмечены стандарты, следуя которым были определены соответствующие свойства.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Нормальная густота и сроки схватывания

Исследуемый МГДШ имеет высокую удельную поверхность. Поэтому увеличение его содержания в цементе повышает нормальную густоту (водопотребность) цемента (рис. 1). Однако в бетонных смесях с применением суперпластифика-

тора увеличение содержания шлака в составе цемента, наоборот, увеличивает подвижность смесей с улучшением их однородности, снижением склонности к расслоению и водоотделению. Поэтому повышенная водопотребность цементов с МГДШ не является проблемой.

Разница по срокам схватывания всех полученных цементов не превышает 20 минут (см. рис. 1). По срокам схватывания цементы с любым содержанием МГДШ соответствуют требованиям ГОСТ 31108, а также ГОСТ 10178.

Исследуемые цементы прошли испытание на равномерность изменения объёма. Расширение в кольце Ле Шателье по ГОСТ 30744 для портландцемента без МГДШ составило 2,0 мм, а для цементов с МГДШ – 0,0 мм. Лепёшки по ГОСТ 310.3 на всех исследуемых цементах после их испытания кипячением не имели каких-либо трещин.

3.2. Тепловыделение

Экзотермия является важным свойством цементов, особенно применяемых для возведения массивных конструкций. На рис. 2 показаны результаты калориметрических измерений, выполненных для цементов с различным содержанием МГДШ. Тепловыделение определялось в соответствии с ГОСТ 310.5 при водоцементном соотношении 0,50 и температуре в термостате 20°C . Измерения проводились с использованием 8-канального изотермического калориметра TamAir (фирма TA Instruments), который позволяет непрерывно регистрировать тепловой поток и тепловую энергию.

Из рис. 2 видно, что при увеличении содержания МГДШ в цементе происходит существенное уменьшение теплового потока и тепловой энергии.

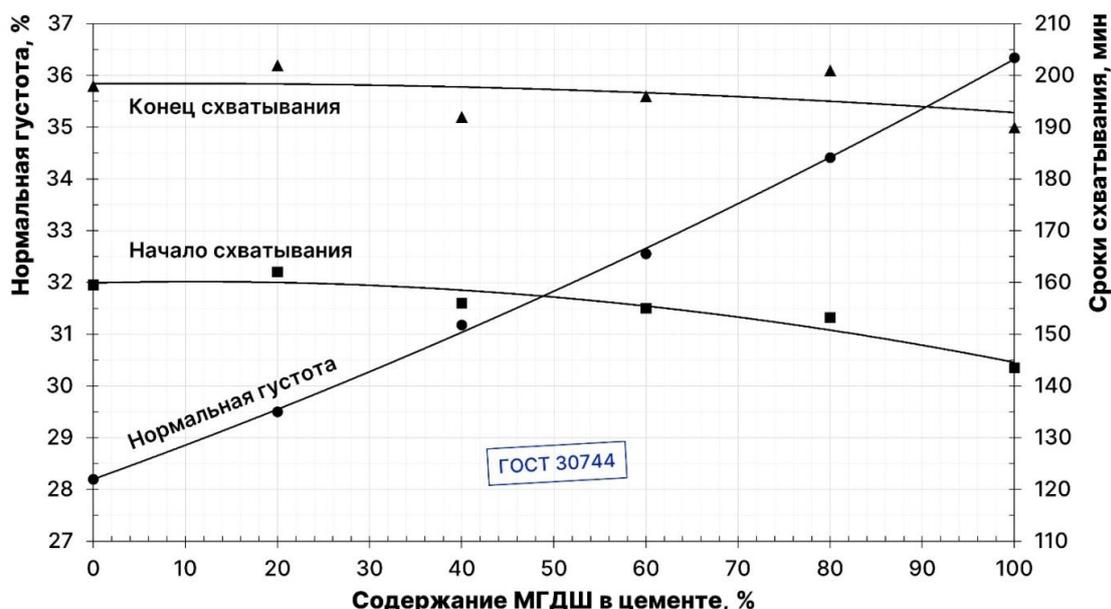


Рис. 1. Нормальная густота и сроки схватывания цементов в зависимости от содержания в них МГДШ

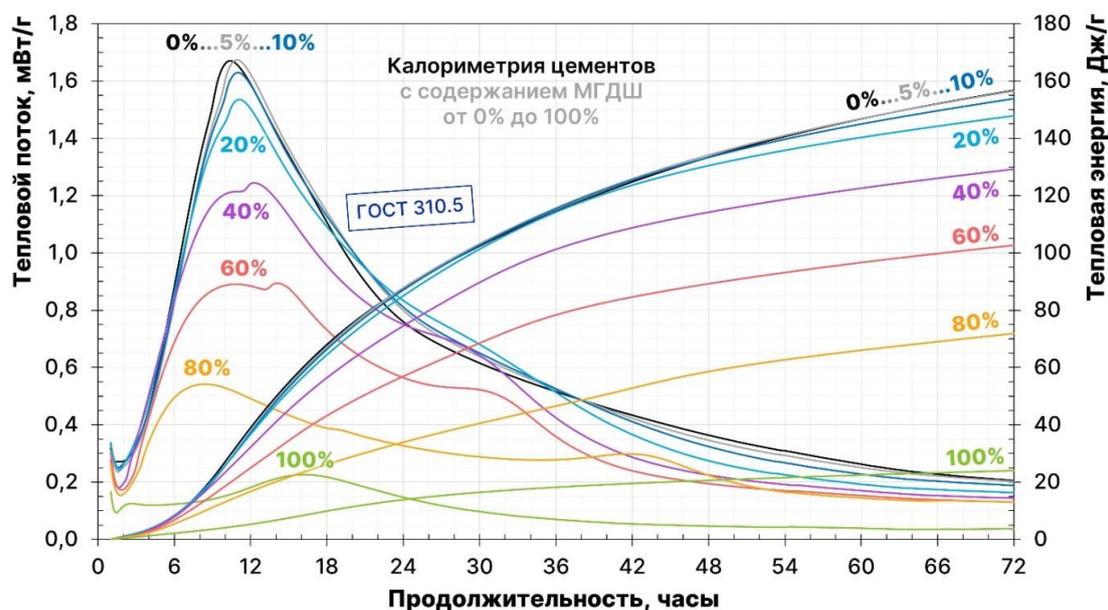


Рис. 2. Тепловой поток и тепловая энергия гидратации цемента с различным содержанием МГДШ

Используя цемент с определённым количеством шлака, можно сократить тепловыделение до безопасного уровня и при этом обеспечить контролируемый самопрогрев бетона, что ускорит гидратацию и твердение шлаковой составляющей цемента, а значит, повысит отношение прочности к тепловыделению. Поэтому цементы со шлаком эффективны при возведении массивных конструкций.

3.3. Активность

Активность цемента, характеризуемая прочностью на сжатие и при изгибе стандартного цементно-песчаного раствора, является его главным показателем качества. С 2004 по 2022 гг. в России было два стандарта, регламентирующих технические условия на общестроительные цементы: ГОСТ 10178 и ГОСТ 31108. Поэтому в стандартах на бетоны и изделия установлены цементы по одному или сразу двум стандартам. В связи с этим для понимания границ применимости содержания шлака в цементе необходимо испытание цементов на соответствие обоим стандартам.

Указанные стандарты имеют разную классификацию цементов и устанавливают разные методы испытаний. Для первого стандарта методы испытаний установлены в ГОСТ 310.4, а для второго – в ГОСТ 30744. Основное отличие заключается в том, что по первому стандарту образцы-балочки изготавливают на монофракционном песке при $V/C = 0,4$ (корректируется до получения стандартного расплыва), а по второму стандарту – на полифракционном песке при $V/C = 0,5$ (без корректировки). В этих стандартах также описаны различные методы введения компонентов и их смешивания, а также уплотнения цементно-песчаных смесей. В соответствии с результатами испытаний,

проведённых по первому стандарту, определяют, соответствует ли цемент указанной марке, а по второму – классу.

При получении стандартных цементно-песчаных растворов согласно ГОСТ 310.4 и с увеличением доли МГДШ в цементе от 0 до 100 % расплыв смесей уменьшался со 113 мм до 107 мм, что соответствует норме в 106–115 мм. Поэтому не было необходимости изменять соотношение воды и цемента (V/C). Все стандартные смеси по ГОСТ 310.4 были приготовлены с V/C , равным 0,4.

На рис. 3, 4 даны результаты испытаний цементов, выполненных по ГОСТ 310.4, где типы и марки цементов определены в соответствии с ГОСТ 10178. А на рис. 5, 6 – результаты испытаний цементов по ГОСТ 30744, где типы и подтипы, классы и подклассы цементов идентифицированы согласно ГОСТ 31108.

На рис. 3, 5 показаны результаты испытаний цементов на прочность при изгибе, проведённых в соответствии с обоими стандартами. Из полученных данных следует, что введение шлака до 23 % не снижает прочность при изгибе на 2-е и 3-и сутки и до 30 % – в 7-е сутки. При содержании шлака менее указанных значений происходит небольшое ускорение набора прочности при изгибе. Увеличение содержания шлака в составе цемента до 68 % способствует значительному увеличению прочности при изгибе к 28-м суткам.

На рис. 4, 6 показаны результаты испытаний цементов на прочность при сжатии, проведённых в соответствии с обоими стандартами. Как и ожидалось, увеличение содержания шлака в цементе приводит к снижению прочности на сжатие цементно-песчаных образцов как на ранних, так и на поздних сроках твердения.

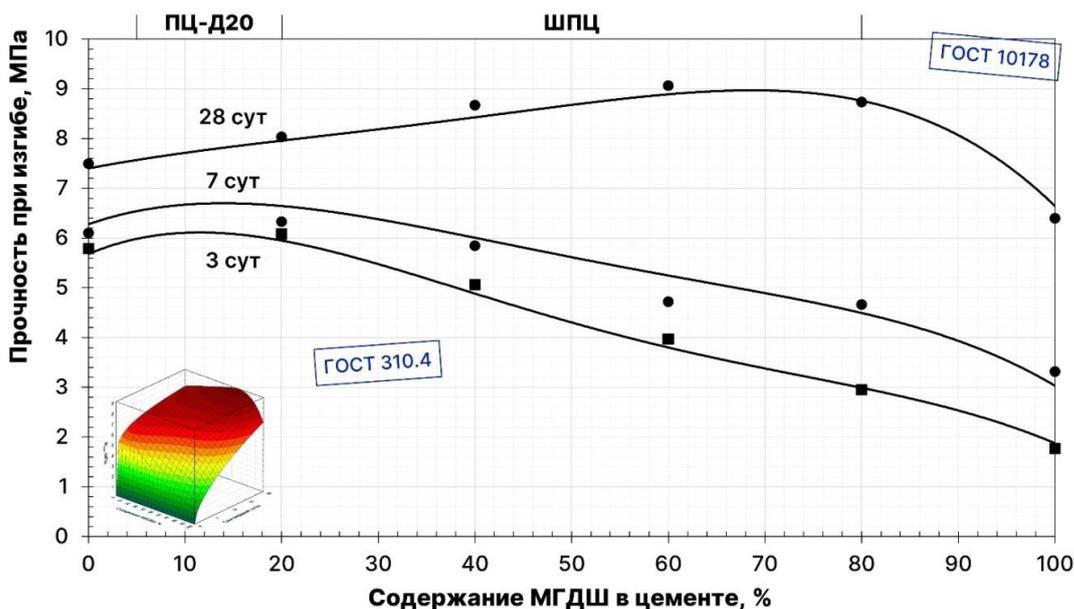


Рис. 3. Влияние содержания МГДШ в цементе на прочность при изгибе по ГОСТ 310.4

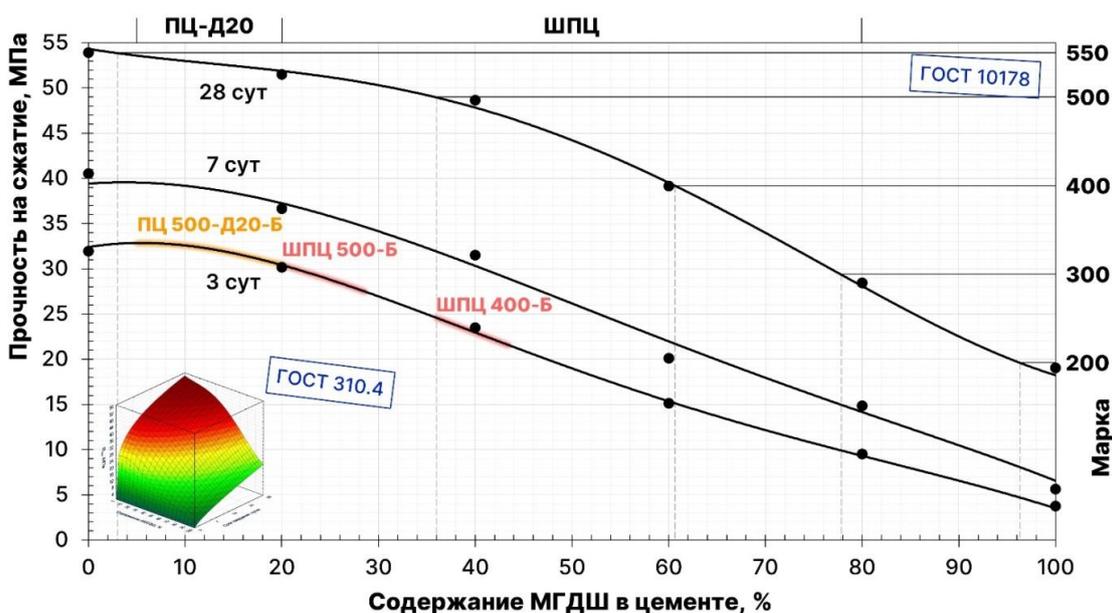


Рис. 4. Влияние содержания МГДШ в цементе на прочность на сжатие по ГОСТ 310.4

Однако были получены следующие марки цементов (см. рис. 4):

- 500 – с содержанием МГДШ до 36 %;
- 400 – до 60 %;
- 300 – до 77 %.

Также были определены классы цементов (см. рис. 6):

- 42,5 – с содержанием МГДШ до 44 %;
- 32,5 – до 64 %;
- 22,5 – до 81 %.

В зависимости от уточнённого содержания МГДШ в рамках одной марки цементы могут быть

быстротвердеющими (см. рис. 4), а в рамках класса – медленно-, нормально- или быстротвердеющими (см. рис. 6).

Обобщим полученные результаты (см. рис. 3–6): введение шлака в состав цемента до 20 % практически не влияет на активность цемента даже в раннем возрасте. Увеличение содержания шлака в цементе свыше 20 % снижает прочность на сжатие, поэтому для получения бетонов с содержанием шлака сверх указанного значения возникает необходимость в подборе составов, который будет значительно ускорен, а его результат будет более

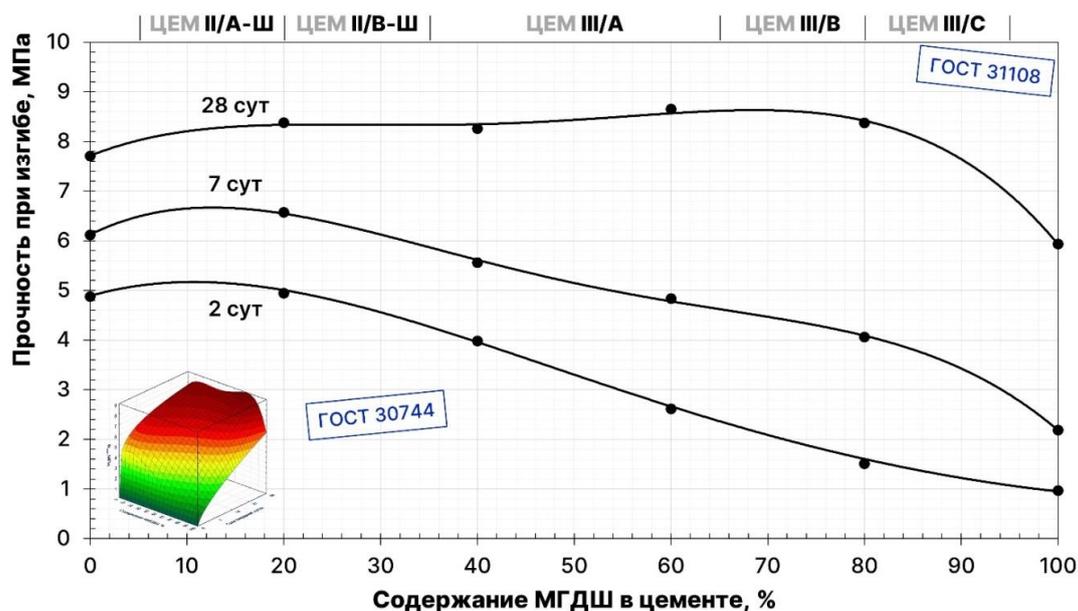


Рис. 5. Влияние содержания МГДШ в цементе на прочность при изгибе по ГОСТ 30744

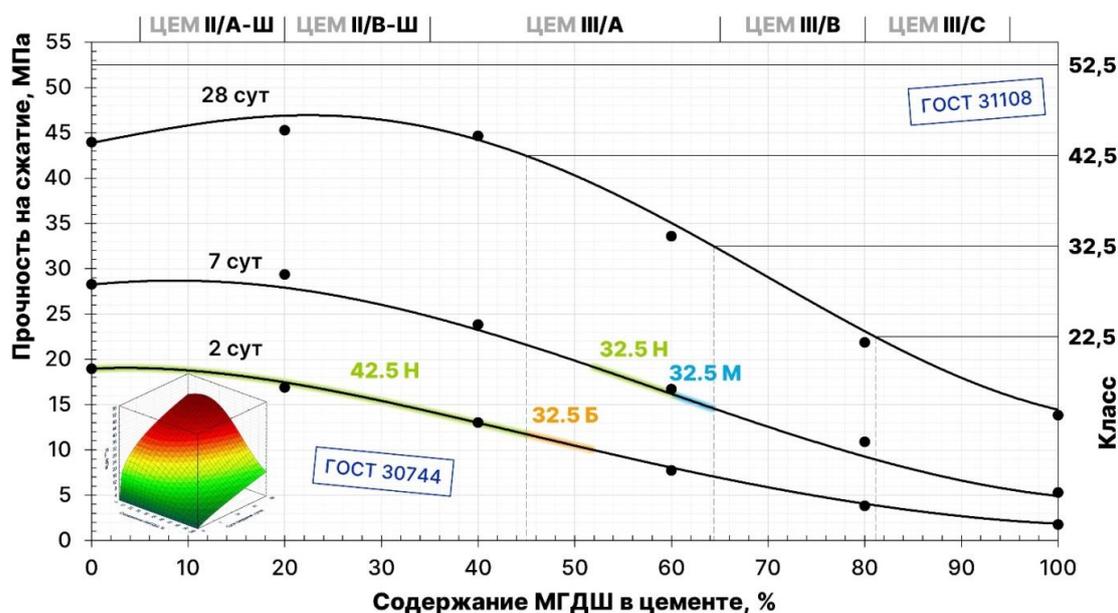


Рис. 6. Влияние содержания МГДШ в цементе на прочность на сжатие по ГОСТ 30744

эффективен с применением многофакторной оптимизации (см. раздел 3.8).

3.4. Сульфатостойкость

Сульфатостойкие цементы и бетоны необходимы для строительства объектов морских, прибрежных, наземных и подземных сред эксплуатации, где на бетон оказывают воздействие различные соли, самыми агрессивными из которых являются сульфаты. В настоящем разделе представлены результаты испытаний на сульфатостойкость цементов с различным содержанием МГДШ. Ис-

пытания проведены по ГОСТ Р 56687–2015. Стандартные мелкозернистые бетоны на всех анализируемых цементах приготовлены с одинаковым В/Ц = 0,40, так как расплыв всех смесей был в интервале 106...115 мм. Из каждого цемента было изготовлено по шесть контрольных и шесть основных образцов мелкозернистого бетона без дефектов с реперами для измерения деформаций. Контрольные образцы поместили в воду, а основные – в 5%-ный водный раствор сульфата натрия (50 г. Na₂SO₄ (ч.д.а.) на 1 литр раствора). Результаты испытаний представлены на рис. 7.

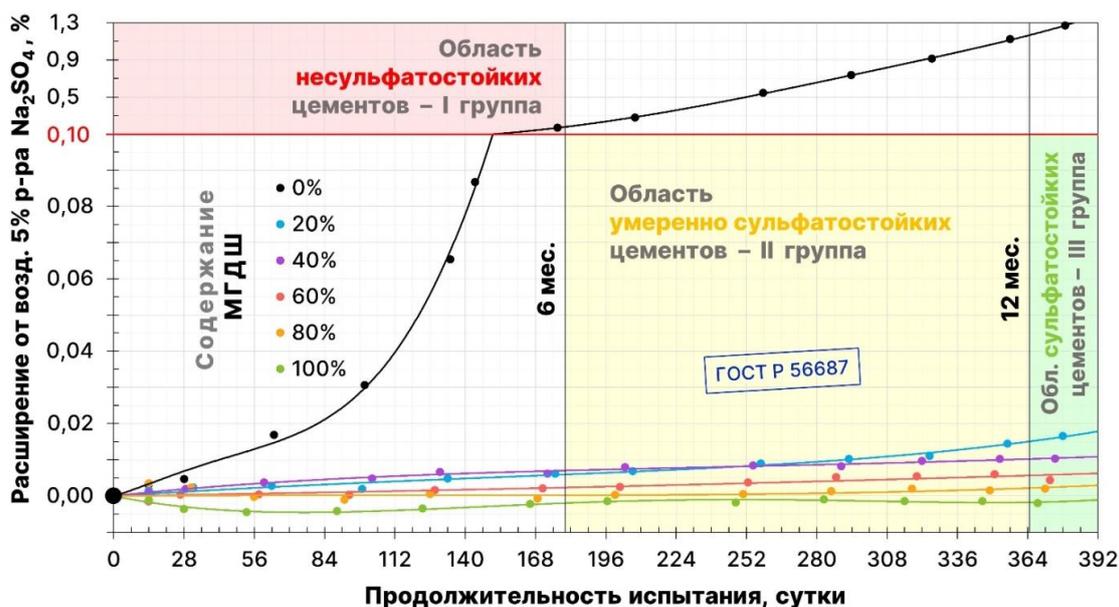


Рис. 7. Средние относительные деформации расширения образцов-балочек при испытании на сульфатостойкость цемента с различным содержанием МГДШ

Из полученных результатов на рис. 7 следует, что образцы, изготовленные на портландцементе без минеральных добавок (МГДШ 0 %), демонстрируют сильное расширение под воздействием сульфатов, которое уже в первый месяц испытаний заметно невооруженным глазом. Критическое значение средней относительной деформации образцов от воздействия сульфатов (0,10 %) достигается до 6 месяцев, что выявляет отсутствие сульфатостойкости бездобавочного портландцемента. К году испытания образцы на портландцементе без минеральных добавок имеют относительные деформации, превышающие порог стандарта в 12 раз. Было замечено, что основные образцы на портландцементе без МГДШ начали отличаться от контрольных спустя два месяца испытаний. На ребрах образцов появились трещины, затем начала крошиться поверхность, особенно на ребрах. Через шесть месяцев все основные образцы из этого цемента стали искривляться. К 12 месяцам на них появились большие трещины, а искривления стали видимыми издали.

Цементы, в которых содержание МГДШ варьируется от 20 до 100 %, демонстрируют деформацию менее 0,02 %, что в пять раз ниже порогового значения. Это позволяет сделать вывод, что добавление шлака в количестве 20 % и более делает цемент сульфатостойким, то есть относит его к третьей группе по сульфатостойкости. При этом чем больше доля МГДШ в цементе, тем меньше деформируются образцы в сульфатной среде (см. рис. 7). Спустя 12 месяцев после начала испытаний на сульфатостойкость основные образцы, изготовленные на цементе с 20%-ным содержанием МГДШ, отличались от контрольных наличием небольших трещин на ребрах. В то же время ос-

новные образцы, выполненные на цементе с содержанием МГДШ 40 % и выше, не отличались от контрольных.

Методом интерполяции полученных результатов (см. рис. 7), определено, что цементы, в которых доля МГДШ составляет менее 9 %, несulfатостойкие (I группа), от 9 до 18 % – умеренно сульфатостойкие (II группа), более 18 % – сульфатостойкие (III группа).

3.5. Прочность

Результаты определения кубиковой прочности на сжатие бетонов с их аппроксимацией на логарифмическую функцию твердения представлены на рис. 8. Для каждого бетона с МГДШ пунктирными линиями дополнительно показано отставание от прочности контрольного бетона (без МГДШ) в зависимости от продолжительности нормального твердения. Отставание рассчитано в процентах как отношение разницы прочностей контрольного бетона и бетона с конкретным содержанием МГДШ к прочности контрольного бетона.

В ранние сроки твердения (до 2 суток) процент введения шлака приблизительно равен проценту отставания. Это означает, что в этом возрасте молотый шлак практически не участвует в гидратации цемента. Однако далее молотый шлак активизируется и вступает в гидратацию совместно с портландцементом и продуктами его гидратации. В результате к 28-м суткам отставание в наборе прочности сокращается в несколько раз. Так, замена 20 % ПЦ на МГДШ снижает прочность на сжатие в возрасте 28 суток всего на 2,1 %, 40 % – на 8,4 %, 60 % – на 14,6 %, 80 % – на 29,7 % (см. рис. 8). То есть отставание в наборе прочности в разы меньше, чем уровень замещения портланд-

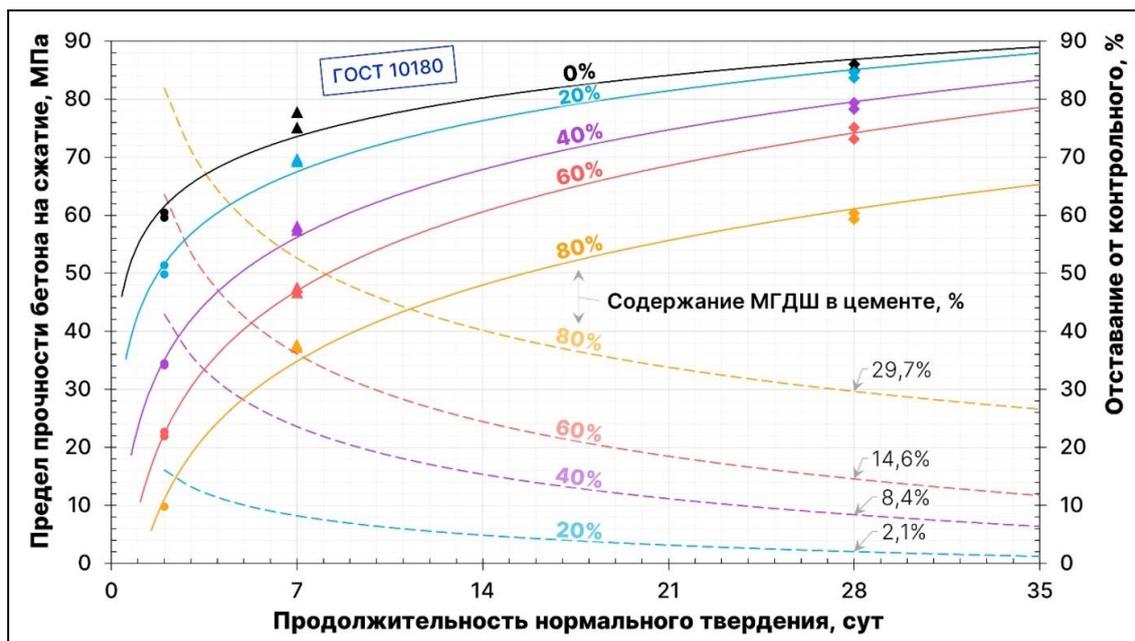


Рис. 8. Предел прочности на сжатие бетонов с различным содержанием МГДШ в цементе в зависимости от продолжительности нормального твердения

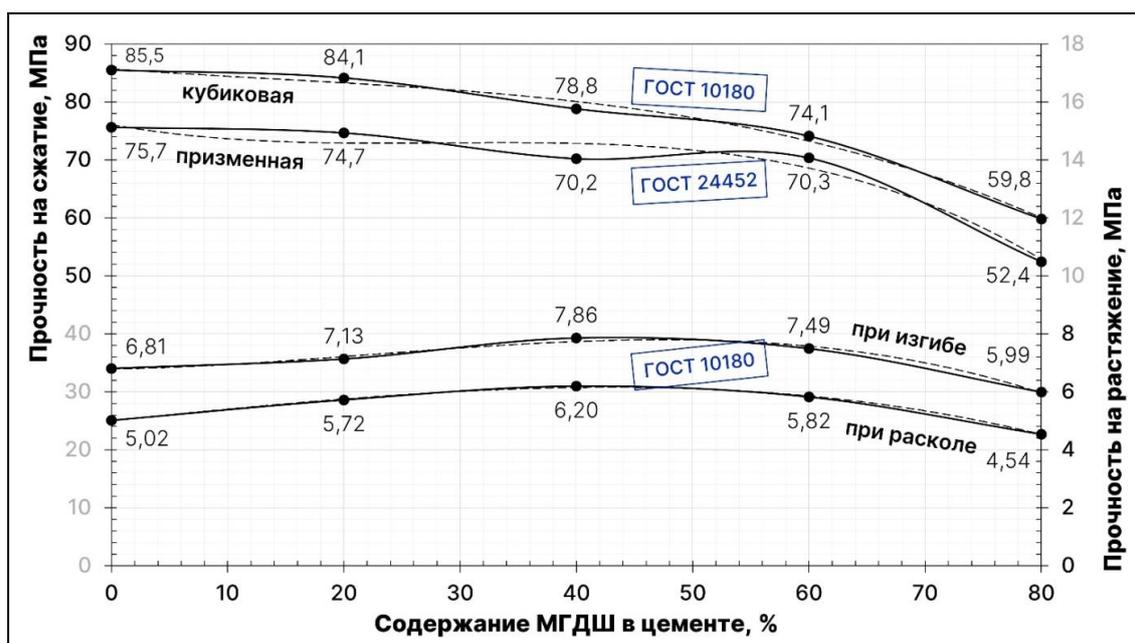


Рис. 9. Кубиковая и призменная прочности бетонов на сжатие, а также на растяжение при изгибе и раскалывании в зависимости от содержания МГДШ в цементе

цемента, что свидетельствует о высокой гидравлической активности применяемого молотого гранулированного доменного шлака.

Средние значения 28-суточной кубиковой прочности на сжатие из рис. 8 нанесены на рис. 9 в зависимости от содержания шлака в цементе. Эти данные принимались в расчёт ожидаемой разрушающей нагрузки образцов-призм, результаты испытаний которых также представлены на рис. 9. Из полученных зависимостей видно, что в воз-

расте 28 суток МГДШ снижает как кубиковую, так и призменную прочность. При этом увеличение содержания шлака в цементе до 20 % снижает прочность на сжатие лишь в пределах погрешности испытания.

Увеличение содержания МГДШ в цементе до 46 % повышает прочность бетона на растяжение при изгибе и при раскалывании (см. рис. 9). Дальнейшее увеличение содержания МГДШ приводит к снижению этих показателей, но при этом бетон

на цементе с содержанием МГДШ до 70 % имеет прочность на растяжение при изгибе и при раскалывании больше, чем у такого же бетона на портландцементе без минеральных добавок. Полученные результаты по прочности на растяжение подтверждаются результатами других исследований [3, 34, 35].

Призмная прочность бетона на цементе с повышенным содержанием шлака, особенно с 60 %, выделяется из общей тенденции: у такого бетона призмная прочность более приближена к кубиковой (см. рис. 9). Нагружение призм, в отличие от нагружения кубов, вызывает в середине высоты образца повышенные растягивающие напряжения из-за ослабленного «эффекта обоймы». То есть призмная прочность на сжатие больше, чем кубиковая, связана с прочностью на растяжение. Наибольшие прочности на растяжение при изгибе и при раскалывании бетонов с содержанием МГДШ 40–60 % и объясняют их повышенную призмную прочность. Повышенная прочность на различные виды растяжений связана с особенностью состава и строения продуктов гидратации цемента. Возможно, именно при таком соотношении ПЦ и МГДШ создается определённый баланс продуктов гидратации цемента, который обеспечивает повышенное сопротивление растяжению. Обнаруженная особенность бетона на цементе с повышенным содержанием МГДШ находит подтверждение и в результатах определения модуля упругости и коэффициента Пуассона бетона.

3.6. Модуль упругости

Результаты определения модуля упругости

бетонов показывают (рис. 10), что увеличение содержания МГДШ вплоть до 60 % приводит к небольшому увеличению этого показателя (прирост на 2,6 %). При этом модуль упругости бетона увеличивается, несмотря на снижение кубиковой и призмной прочностей бетона на сжатие (см. рис. 9). Дальнейшее увеличение содержания МГДШ с 60 до 80 % приводит к снижению модуля упругости бетона, но не значительно.

МГДШ в количестве до 60 % в составе цемента способствует повышению стойкости бетона к растягивающим напряжениям, снижая в результате не только продольные, но ещё сильнее поперечные деформации, возникающие от воздействия механических сжимающих напряжений. Поэтому на рис. 10 видно, что коэффициент Пуассона бетона несколько снижается.

3.7. Морозостойкость

Авторами настоящей работы ранее была доказана возможность получения на цементе с содержанием МГДШ до 60 % марки бетона по морозостойкости до F₂ 400 (F₁ 1 000) [36, 37]. Это стало возможным благодаря увеличенному водоредуцированию с помощью поликарбоксилатного суперпластификатора. В работе показано, что, создавая бетон особо низкой проницаемости, высокая морозостойкость достигается даже без специального воздухововлечения и с большим замещением ПЦ на МГДШ. Далее были представлены результаты исследования механизма морозного разрушения такого бетона [38].

3.8. Эффективность

Введение МГДШ в состав цемента до 20 % не

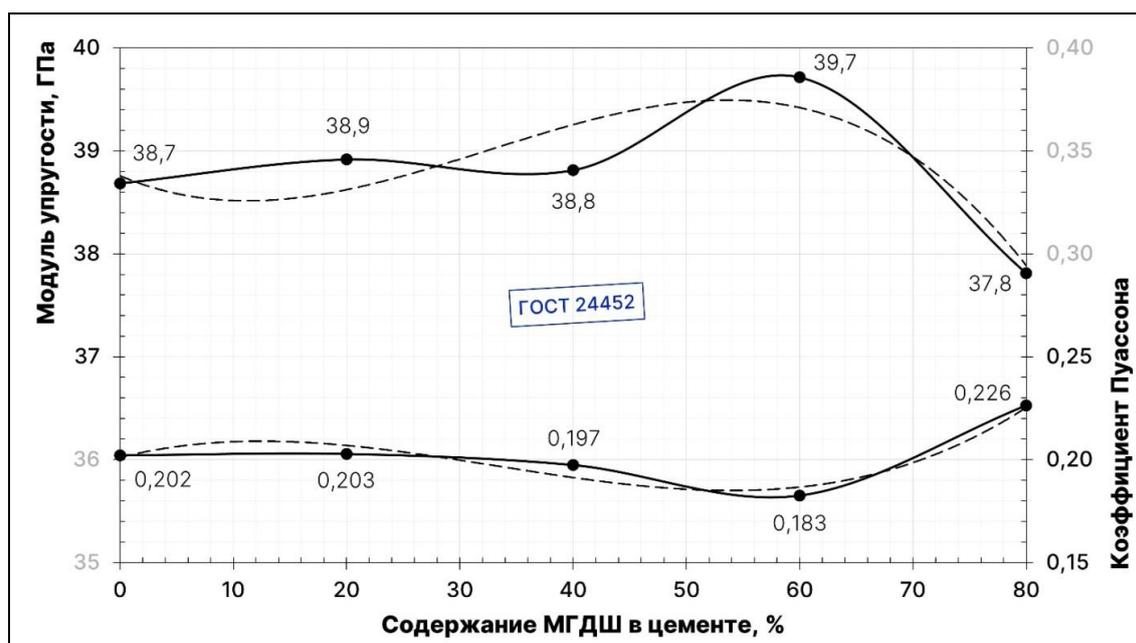


Рис. 10. Модуль упругости и коэффициент Пуассона бетона в зависимости от содержания МГДШ в цементе

вызывает потребность в подборе нового состава бетона, так как такая дозировка шлака практически не снижает прочность на сжатие и при этом улучшает все другие показатели качества бетонных смесей и бетонов. Учитывая, что МГДШ имеет стоимость в 1,5–2,5 раза ниже стоимости ПЦ, то замена даже 20 % ПЦ на МГДШ даёт ощутимую экономию вместе с многочисленными преимуществами, представленными в настоящей статье.

Введение в цемент МГДШ свыше 20 % вызывает необходимость в подборе нового состава бетона, так как МГДШ в таком количестве уже существенно влияет на скорость твердения (прочность в раннем возрасте). В этом случае рекомендуется применять многофакторную оптимизацию состава бетона путём варьирования расхода цемента и содержания шлака в нём, с подбором в каждой точке плана соотношения заполнителей, водоцементного отношения и дозировки суперпластификатора, с построением по результатам подбора математической модели, из которой далее можно вычислить оптимальный состав для заданных параметров качества. Такой подход к подбору менее затратен по времени и расходам на испытания и, главное, – значительно эффективнее по результату. Многофакторная оптимизация позволяет значительно повысить экономическую эффективность от использования МГДШ благодаря тому, что это позволяет назначить самый эффективный состав бетона на применяемых материалах [39].

В некоторых исследованиях встречается информация, что оптимальным (наиболее эффективным) содержанием молотого гранулированного доменного шлака в составе цемента является 20–30 %. Но результаты настоящего исследования не позволяют с этим согласиться. Оптимальное содержание МГДШ в составе цемента следует определять для конкретных условий и по результатам

многофакторной оптимизации, как изложено выше. В каждом конкретном случае оптимальным содержанием МГДШ может быть от 20 до 60 %, исходя из полученных собственных результатов и результатов других исследований, представленных во вводной части настоящей статьи. К аналогичному выводу приводят и другие исследования эффективности МГДШ [40].

Заключение

Управляя содержанием МГДШ, можно получать цемент с требуемой активностью. Цементы, получаемые смешиванием ПЦ (ЦЕМ I 42.5 Н) и МГДШ, способны соответствовать требованиям к классам 22,5–42,5 и маркам 300–500 в зависимости от содержания шлака в составе цемента.

На основании обзора результатов исследований учёных из разных стран и собственных проведённых испытаний по основным показателям качества цементов и бетонов сделан вывод, что эффективное содержание МГДШ в составе цемента принадлежит интервалу от 20 до 60 %. Результатами настоящего исследования установлено, что в этом интервале увеличение содержания МГДШ в цементе:

- значительно снижает тепловыделения при гидратации и твердении;
- многократно увеличивает сульфатостойкость;
- увеличивает прочности на растяжение при изгибе и раскалывании;
- повышает модуль упругости и снижает коэффициент Пуассона бетона.

С применением многофакторной оптимизации состава бетона на цементе с содержанием в указанном интервале МГДШ производства ООО «Мечел-Материалы» можно получать бетоны с любыми требуемыми строительными-техническими свойствами.

Список литературы

1. Сатарин В.И. Шлакопортландцемент. Основной доклад. VI Международный конгресс по химии цемента. М.: б.и., 1974. 32 с.
2. Сыркин Я.М., Френкель М.Б. Химия и технология шлакопортландцемента. Киев: Госстройиздат УССР, 1962. 179 с.
3. Ozbay E., Erdemir M., Durmus H.I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review // *Constr. Build. Mater.* 2016. Vol. 105. P. 423–434. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153
4. Saranya P., Nagarajan P., Shashikala A.P. Eco-friendly GGBS Concrete: A State-of-The-Art Review // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 330, no 1. P. 12057. DOI: 10.1088/1757-899X/330/1/012057
5. Improvement of two-component grouts by the use of ground granulated blast furnace slag / L. Andre, C. Bacquie, G. Comin, R. Ploton, D. Achard, L. Frouin, et al // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022. Vol. 122. P. 104369. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104369
6. Evaluation of the engineering properties and durability of mortar produced using ground granulated blast-furnace slag and stainless steel reduced slag / H.Y. Wang, W.C. Wang, J.C. Wang, Y.W. Chen // *Constr. Build. Mater.* 2021. Vol. 280. P. 122498. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122498
7. Dinakar P., Sethy K.P., Sahoo U.C. Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag // *Mater. Des.* 2013. Vol. 43. P. 161–169. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.049

8. GGBS And Fly Ash Effects on Compressive Strength by Partial Replacement of Cement Concrete / A.A. Phul, M.J. Memon, S.N.R Shah, A.R. Sandhu // *Civil Engineering Journal*. 2019. Vol. 5, No 4. P. 913–921. DOI: 10.28991/cej-2019-03091299
9. The curing times effect on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar / C.M. Yun, M.R. Rahman, C.Y.W. Phing, A.W.M. Chie, M.K.B. Bakri // *Constr. Build. Mater.* 2020. Vol. 260. P. 120622. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120622
10. Study on properties of concrete using slag as partial replacement of cement / G. Raj, D. Rai, R.S. Singh, A. Sofi // *Mater. Today Proc.* 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.040
11. Aghaeipour A., Madhkhan M. Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability // *Constr. Build. Mater.* 2017. Vol. 141. P. 533–541. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.019
12. Sreekumaran S., Saravana Raja Mohan K. Low-Velocity impact resistance of reactive powder concrete modified using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash // *Constr. Build. Mater.* 2022. Vol. 341. P. 127891. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127891
13. Study on the flexural fatigue performance and fractal mechanism of concrete with high proportions of ground granulated blast-furnace slag / L.P. Guo, W. Sun, K.R. Zheng, H.J. Chen, B. Liu // *Cem. Concr. Res.* 2007. Vol. 37, No 2. P. 242–250. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.11.009
14. Rao S.K., Sravana P., Rao T.C. Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS // *Constr. Build. Mater.* 2016. Vol. 114. P. 925–933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.004
15. Wang H.Y. The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS // *Cem. Concr. Compos.* 2008. Vol. 30, No 10. P. 992–999. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.12.003
16. Improving the post-fire behaviour of steel slag coarse aggregate concrete by adding GGBFS / Z.C. Huang, J.C.M. Ho, J. Cui, F.M. Ren, X. Cheng, M.H. Lai // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76. P. 107283. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107283
17. Chloride binding and diffusion of slag blended concrete mixtures / D.G. Mapa, H. Zhu, F. Nosouhian, N. Shanahan, K.A. Riding, A. Zayed // *Constr. Build. Mater.* 2023. Vol. 388. P. 131584. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131584
18. Iodide and chloride ions diffusivity, pore characterization and microstructures of concrete incorporating ground granulated blast furnace slag / H. Jin, Z. Li, W. Zhang, J. Liu, R. Xie, L. Tang, et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 16. P. 302–321. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.155
19. Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time / V. Bouteiller, C. Cremona, V. Baroghel-Bouny, A. Maloula // *Cem. Concr. Res.* 2012. Vol. 42, No 11. P. 1456–1467. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.07.004
20. Shankar Biswal U., Dinakar P. Evaluating corrosion resistance of recycled aggregate concrete integrating ground granulated blast furnace slag // *Constr. Build. Mater.* 2023. Vol. 370. P. 130676. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130676
21. Elaboration of a Self-Compacting mortar based on concrete demolition waste incorporating blast furnace slag / B. Sara, A. Mhamed, B. Otmane, E. Karim // *Constr. Build. Mater.* 2023. Vol. 366. P. 130165. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130165
22. The very early-age behaviour of Ultra-High Performance Concrete containing ground granulated blast furnace slag / S. Moula, A. Ben Fraj, T. Watez, M. Bouasker, N. Bel Hadj Ali // *Constr. Build. Mater.* 2023. Vol. 400. P. 132630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132630
23. Effect of ground granulated blast furnace slag on cement hydration and autogenous healing of concrete / J. Sun, K.H. Kong, C.Q. Lye, S.T. Quek // *Constr. Build. Mater.* 2022. Vol. 315. P. 125365. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125365
24. Choi Y.C., Kim J., Choi S. Mercury intrusion porosimetry characterization of micropore structures of high-strength cement pastes incorporating high volume ground granulated blast-furnace slag // *Constr. Build. Mater.* 2017. Vol. 137. P. 96–103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.076
25. Yoon S., Jeon C., Choi W. Durability of blast-furnace slag concrete mixed with expansive and swelling admixtures // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18, No May. P. e02179. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02179
26. Osborne G.J. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete // *Cem. Concr. Compos.* 1999. Vol. 21, No 1. P. 11–21. DOI: 10.1016/S0958-9465(98)00032-8
27. Lukowski P., Salih A. Durability of Mortars Containing Ground Granulated Blast-furnace Slag in Acid and Sulphate Environment // *Procedia Eng.* 2015. Vol. 108. P. 47–54. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.118
28. Abdalqader A., Fayyad T., Sonebi M. Comparative study on the effect of different supplementary cementitious materials on Alkali-silica reaction of self-compacting concrete // *Mater. Today Proc.* 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.08.246
29. Kwon Y. A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect // *Cem. Concr. Res.* 2005. Vol. 35, No 7. P. 1305–1313. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.07.002

30. Hooton R.D. Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2000. Vol. 27, No 4. P. 754–760. DOI: 10.1139/cjce-27-4-754
31. Oueslati O., Duchesne J. Resistance of blended cement pastes subjected to organic acids: Quantification of anhydrous and hydrated phases // *Cem. Concr.Compos.* 2014. Vol. 45. P. 89–101. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.007
32. Taylor R., Richardson I.G., Brydson R.M.D. Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement-ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag // *Cem. Concr.Res.* 2010. Vol. 40, No 7. P. 971–983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.012
33. Richardson I.G., Groves G.W. Microstructure and microanalysis of hardened cement pastes involving ground granulated blast-furnace slag // *J. Mater. Sci.* 1992. Vol. 27, No 22. P. 6204–6212. DOI: 10.1007/BF01133772
34. Performance of reinforced concrete beams cast with different percentages of GGBS replacement to cement / R.A. Hawileh, J.A. Abdalla, F. Fardmanesh, P. Shahsana, A. Khalili // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 17, No 3. P. 511–519. DOI: 10.1016/j.acme.2016.11.006
35. Air void system and frost-salt scaling of concrete containing slag-blended cement / Z. Giergiczny, M.A. Glinicki, M. Sokołowski, M. Zielinski // *Constr. Build. Mater.* 2009. Vol. 23, No 6. P. 2451–2456. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.10.001
36. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Кирсанова А.А. Бетон на основе шлакопортландцемента для дорожных и аэродромных покрытий // *Цемент и его применение*. 2019. № 2. С. 96–102.
37. Крамар Л.Я., Иванов И.М. Быстротвердеющий, высокопрочный и морозостойкий бетон на основе шлакопортландцемента // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2021. Т. 21, № 1. С. 48–53. DOI: 10.14529/build210106
38. Иванов И.М., Крамар Л.Я., Шудяков К.В. Механизм морозного разрушения бетонов с особо низкой проницаемостью // *Цемент и его применение*. 2022. № 4. С. 57–66.
39. Иванов И.М., Крамар Л.Я. Математическая модель для назначения высокоэффективного состава бетона с использованием молотого гранулированного доменного шлака // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2020. Т. 20, № 4. С. 28–41. DOI: 10.14529/build200404
40. Ganesh Babu K., Sree Rama Kumar V. // *Cem. Concr. Res.* 2000. Vol. 30, No 7. P. 1031–1036. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00271-4

References

1. Satarin V.I. *Shlakoportlandtsement. Osnovnoy doklad. VI Mezhdunarodnyy kongress po khimii tsementa* [Slag-portland cement. The main report. VI International Congress on Cement Chemistry]. Moscow: without Publ.; 1974. 32 p. (in Russ.)
2. Syrkin Ya.M., Frenkel M.B. *Khimiya i tekhnologiya shlakoportlandtsementa* [Chemistry and technology of Portland slag cement]. Kyiv: Gosstroyizdat USSR Publ.; 1962. 179 p. (in Russ.)
3. Ozbay E., Erdemir M., Durmus H.I. Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review. *Constr. Build. Mater.* 2016;105:423–434. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.153
4. Saranya P., Nagarajan P., Shashikala A.P. Eco-friendly GGBS Concrete: A State-of-The-Art Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;330(1):12057. DOI: 10.1088/1757-899X/330/1/012057
5. Andre L., Bacquie C., Comin G., Ploton R., Achard D., Frouin L., et al. Improvement of two-component grouts by the use of ground granulated blast furnace slag. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2022;122:104369. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104369
6. Wang H.Y., Wang W.C., Wang J.C., Chen Y.W. Evaluation of the engineering properties and durability of mortar produced using ground granulated blast-furnace slag and stainless steel reduced slag. *Constr. Build. Mater.* 2021;280:122498. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122498
7. Dinakar P., Sethy K.P., Sahoo U.C. Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag. *Mater. Des.* 2013;43:161–169. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.049
8. Phul A.A., Memon M.J., Shah S.N.R., Sandhu A.R. GGBS And Fly Ash Effects on Compressive Strength by Partial Replacement of Cement Concrete. *Civil Engineering Journal*. 2019;5(4):913–921. DOI: 10.28991/cej-2019-03091299
9. Yun C.M., Rahman M.R., Phing C.Y.W., Chie A.W.M., Bakri M.K.B. The curing times effect on the strength of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) mortar. *Constr. Build. Mater.* 2020;260:120622. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120622
10. Raj G., Rai D., Singh R.S., Sofi A. Study on properties of concrete using slag as partial replacement of cement. *Mater. Today Proc.* 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.04.040

11. Aghaeipour A., Madhkan M. Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability. *Constr. Build. Mater.* 2017;141:533–541. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.019
12. Sreekumaran S., Saravana Raja Mohan K. Low-Velocity impact resistance of reactive powder concrete modified using ground granulated blast furnace slag and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* 2022;341:127891. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127891
13. Guo L.P., Sun W., Zheng K.R., Chen H.J., Liu B. Study on the flexural fatigue performance and fractal mechanism of concrete with high proportions of ground granulated blast-furnace slag. *Cem. Concr. Res.* 2007;37(2):242–250. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.11.009
14. Rao S.K., Sravana P., Rao T.C. Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS. *Constr. Build. Mater.* 2016;114:925–933. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.004
15. Wang H.Y. The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS. *Cem. Concr. Compos.* 2008;30(10):992–999. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2007.12.003
16. Huang Z.C., Ho J.C.M., Cui J., Ren F.M., Cheng X., Lai M.H. Improving the post-fire behaviour of steel slag coarse aggregate concrete by adding GGBFS. *Journal of Building Engineering.* 2023;76:107283. DOI: 10.1016/j.job.2023.107283
17. Mapa D.G., Zhu H., Nosouhian F., Shanahan N., Riding K.A., Zayed A. Chloride binding and diffusion of slag blended concrete mixtures. *Constr. Build. Mater.* 2023;388:131584. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131584
18. Jin H., Li Z., Zhang W., Liu J., Xie R., Tang L., et al. Iodide and chloride ions diffusivity, pore characterization and microstructures of concrete incorporating ground granulated blast furnace slag. *Journal of Materials Research and Technology.* 2022;16:302–321. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.11.155
19. Bouteiller V., Cremona C., Baroghel-Bouny V., Maloula A. Corrosion initiation of reinforced concretes based on Portland or GGBS cements: Chloride contents and electrochemical characterizations versus time. *Cem. Concr. Res.* 2012;42(11):1456–1467. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.07.004
20. Shankar Biswal U., Dinakar P. Evaluating corrosion resistance of recycled aggregate concrete integrating ground granulated blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* 2023;370:130676. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130676
21. Sara B., Mhamed A., Otmane B., Karim E. Elaboration of a Self-Compacting mortar based on concrete demolition waste incorporating blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* 2023;366:130165. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130165
22. Moula S., Ben Fraj A., Wattez T., Bouasker M., Bel Hadj Ali N. The very early-age behaviour of Ultra-High Performance Concrete containing ground granulated blast furnace slag. *Constr. Build. Mater.* 2023;400:132630. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132630
23. Sun J., Kong K.H., Lye C.Q., Quek S.T. Effect of ground granulated blast furnace slag on cement hydration and autogenous healing of concrete. *Constr. Build. Mater.* 2022;315:125365. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125365
24. Choi Y.C., Kim J., Choi S. Mercury intrusion porosimetry characterization of micropore structures of high-strength cement pastes incorporating high volume ground granulated blast-furnace slag. *Constr. Build. Mater.* 2017;137:96–103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.076
25. Yoon S., Jeon C., Choi W. Durability of blast-furnace slag concrete mixed with expansive and swelling admixtures. *Case Studies in Construction Materials.* 2023;18:e02179. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02179
26. Osborne G.J. Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete. *Cem. Concr. Compos.* 1999;21(1):11–21. DOI: 10.1016/S0958-9465(98)00032-8
27. Lukowski P., Salih A. Durability of Mortars Containing Ground Granulated Blast-furnace Slag in Acid and Sulphate Environment. *Procedia Eng.* 2015;108:47–54. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.06.118
28. Abdalqader A., Fayyad T., Sonebi M. Comparative study on the effect of different supplementary cementitious materials on Alkali-silica reaction of self-compacting concrete. *Mater. Today Proc.* 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2023.08.246
29. Kwon Y. A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect. *Cem. Concr. Res.* 2005;35(7):1305–1313. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.09.021
30. Hooton R.D. Canadian use of ground granulated blast-furnace slag as a supplementary cementing material for enhanced performance of concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering.* 2000;27(4):754–760. DOI: 10.1139/cjce-27-4-754
31. Oueslati O., Duchesne J. Resistance of blended cement pastes subjected to organic acids: Quantification of anhydrous and hydrated phases. *Cem. Concr. Compos.* 2014;45:89–101. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.09.007
32. Taylor R., Richardson I.G., Brydson R.M.D. Composition and microstructure of 20-year-old ordinary Portland cement-ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100% slag. *Cem. Concr. Res.* 2010;40(7):971–983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.02.012

33. Richardson I.G., Groves G.W. Microstructure and microanalysis of hardened cement pastes involving ground granulated blast-furnace slag. *J. Mater. Sci.* 1992;27(22):6204–6212. DOI: 10.1007/BF01133772
34. Hawileh R.A., Abdalla J.A., Fardmanesh F., Shahsana P., Khalili A. Performance of reinforced concrete beams cast with different percentages of GGBS replacement to cement. *Archives of Civil and Mechanical Engineering.* 2017;17(3):511–519. DOI: 10.1016/j.acme.2016.11.006
35. Giergiczny Z., Glinicki M.A., Sokołowski M., Zielinski M. Air void system and frost-salt scaling of concrete containing slag-blended cement. *Constr. Build. Mater.* 2009;23(6):2451–2456. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.10.001
36. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Kirsanova A.A. [Concrete based on Portland slag cement for road and airfield pavements]. *Tsement i ego primenenie* [Cement and its application]. 2019;2:96–102.(in Russ.)
37. Kramar L.Ya., Ivanov I.M. Fast-Hardening, High-Strength and Frost Resistant Concrete Based on Slag Portland Cement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture.* 2021;21(1):48–53. (in Russ.)(in Russ.) DOI: 10.14529/build210106
38. Ivanov I.M., Kramar L.Ya., Shuldyakov K.V. [The mechanism of frost destruction of concrete with particularly low permeability]. *Tsement i ego primenenie* [Cement and its application]. 2022;4:57–66.(in Russ.)
39. Ivanov I.M., Kramar L.Ya. Mathematical Model for Assigning High-Effective Concrete Mix Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture.* 2020;20(4):28–41. (in Russ.) DOI: 10.14529/build200404
40. Ganesh Babu K., Sree Rama Kumar V. Efficiency of GGBS in concrete. *Cem. Concr. Res.* 2000;30(7):1031–1036. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00271-4

Информация об авторах:

Иванов Илья Михайлович, аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ivanov.im@bk.ru; инженер-технолог ООО «Мечел-Материалы», Челябинск, Россия; IlyaIvanov@mechel.ru

Крамар Людмила Яковлевна, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник и профессор кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kramarli@susu.ru

Мордовцева Мария Витальевна, аспирант кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; mariamordovtseva@mail.ru

Information about the authors:

Ilya M. Ivanov, Post-graduate Student, Department of Building Materials and Products, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; ivanov.im@bk.ru; Process engineer of the Department of Technical Development, LLC “Mechel-Materials”, Chelyabinsk, Russia; IlyaIvanov@mechel.ru

Lyudmila Ya. Kramar, Doctor (Eng.), Professor, Department of Building Materials and Products, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kramarli@susu.ru

Mariya V. Mordovtseva, Post-graduate Student, Department of Building Materials and Products, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; mariamordovtseva@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.04.2024, принята к публикации 15.04.2024.

The article was submitted on 08.04.2024; approved after review on 15.04.2024.