Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>
Russian journal of transport engineering

2018, №1, Том 5 / 2018, No 1, Vol 5 <https://t-s.today/issue-1-2018.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/18SATS118.pdf>

DOI: 10.15862/18SATS118 (<http://dx.doi.org/10.15862/18SATS118>)

Статья поступила в редакцию 19.02.2018; опубликована 11.04.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ципурский И.Л., Коконова А.А., Данилова Е.Д., Ковченко И.В., Руденко М.И. Доменные гранулированные шлаки при производстве многокомпонентных цементных систем: технология производства и особенности применения // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2018 №1, <https://t-s.today/PDF/18SATS118.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/18SATS118

For citation:

Tsipursky I.L., Kokonova A.A., Danilova E.D., Kovchenko I.V., Rudenko M.I. (2018). Domain granulated slag in the production of multicomponent cement systems: production technology and application features. *Russian journal of transport engineering*, [online] 1(5). Available at: <https://t-s.today/PDF/18SATS118.pdf> (in Russian) DOI: 10.15862/18SATS118

УДК 691

ГРНТИ 67.09.33

Ципурский Илья Лазаревич

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
Кандидат технических наук, профессор
E-mail: Vatralla.m1@gmail.com

Коконова Айдай Абдылдаевна

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
Студент
E-mail: Vatralla.m1@gmail.com

Данилова Елена Дмитриевна

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
Студент
E-mail: Vatralla.m1@gmail.com

Ковченко Илья Владимирович

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
Студент
E-mail: Vatralla.m1@gmail.com

Руденко Максим Игоревич

ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Москва, Россия
Студент
E-mail: rrudenko.maksim@yandex.ru

**Доменные гранулированные шлаки
при производстве многокомпонентных цементных систем:
технология производства и особенности применения**

Аннотация. В статье рассматриваются особенности технологии производства и применения доменных гранулированных шлаков при производстве многокомпонентных

цементных систем. Развитие жилищного, гражданского и промышленного строительства в России на современном этапе связывается с повышением качества, сближением его с общеевропейским и снижением себестоимости строительных материалов, наиболее приоритетными из которых остаются бетон и железобетон. Многокомпонентность цементных систем, являющаяся одним из наиболее перспективных направлений, представляет собой значимый фактор, обеспечивающий снижение энергоемкости и себестоимости бетона и железобетона и придающий им специальные свойства. Известно, что средние удельные затраты энергии на цемент составляют 60-200, а на плотные заполнители – 4,3-6,8 кг у.т./м³. Поэтому снижение расхода цемента в бетоне за счет применения ММ с более низкой (в несколько раз) энергоемкостью и себестоимостью является эффективным технологическим приемом в технико-экономическом аспекте. Автор приходит к выводу, что анализ проблемы использования доменных гранулированных шлаков в производстве вяжущих веществ или в бетоне показал, что основным вопросом, сдерживающим их применение, является более низкая прочность цемента и бетона со шлаком относительно бездобавочных составов. Наиболее эффективным способом повышения прочности шлаковых МЦС является использование тонкодисперсного шлака с оптимальными параметрами (дисперсностью и содержанием), а также их сульфатно-щелочная активация, позволяющая получать высокопрочные цементы и бетоны. что производство шлакощелочных цементов и бетонов ввиду нестабильности их свойств и сложности технологии не получило массового внедрения. Поэтому дальнейшая разработка теоретических и практических рекомендаций по повышению эффективности использования тонкодисперсного доменного гранулированного шлака в производстве цемента и бетона является одной из наиболее актуальных и перспективных научных проблем в строительстве, имеющей экологическое значение.

Ключевые слова: доменные гранулированные шлаки; многокомпонентные цементные системы; проблемы применения; цемент; строительство; железобетон; энергоемкость

Доменные шлаки для изготовления различного вида строительных материалов используются в нашей стране более 100 лет. В настоящее время по ряду организационно-технических причин производство ШПЦ в России значительно сократилось¹.

Организации производства шлаковых цементов и его развитию способствовали фундаментальные исследования Л.А. Алимova, Ю.М. Баженова, А.А. Байкова, В.Г. Батракова, И.А. Белелюбского, Д.С. Белянкина, П.П. Будникова, Х.С. Воробьева, Ю.Д. Чистова, А.Е. Шейкина, С.В. Шестоперова, М.М. Шульца, Р. Моргенсона и др.

Для шлаковых цементов преимущественное применение получают основные и кислые доменные шлаки, а также шлаки электротермофосфорного производства. Кроме того, в качестве сырьевых материалов при производстве клинкера в ограниченном количестве используются и некоторые другие виды металлургических и топливных шлаков [1].

Доменные гранулированные шлаки для производства цементов получают на установках мокрой, полусухой и сухой грануляции. Качество шлака мокрой грануляции, ввиду большего содержания (до 95 %) стекловидной фазы, оценивается выше, чем шлаков, полученных другими способами [3]. Однако шлак мокрой грануляции имеет высокую влажность (до 40 %), и поэтому его применение в производстве шлаковых цементов несколько удорожает последние за счет большого расхода топлива на его сушку (до 80 кг у.т. на 1 т сухого гранулята).

¹ Новая технология сухой формовки изделий с цементной связкой меняет концепцию заводского производства // СРІ – Международное бетонное производство. 2004. №4. С. 46.

По содержанию шлака, выпускаемый в большинстве стран ШПЦ делится на две группы. К первой группе относится ШПЦ с содержанием шлака 25-40 %, часто применяемый взамен портландцемента. Вторая группа – ШПЦ, содержащий 40-80 % шлака, который применяется, главным образом, в строительной индустрии, гидротехническом строительстве, как цемент с низкой экзотермией и в строительстве сооружений, подвергающихся воздействию агрессивных сред [5]. Исследования ряда авторов по изучению свойств ШПЦ с содержанием шлака от 21 до 90 % показали, что его оптимальная активность достигается при содержании в нем около 40 % доменного гранулированного шлака, а процесс гидратации ШПЦ, содержащего до 60 % шлака, протекает аналогично портландцементу.

В ряде исследований оптимальное содержание шлака в МЦС связывается с собственной дисперсностью и дисперсностью клинкерного компонента, условиями твердения, эксплуатационными условиями и находится в пределах 40-80 %. При этом наиболее эффективное его содержание в составе МЦС, твердеющих в НУ и условиях ТО, соответственно составляет 40 и 60 %. Имеются также данные о необходимости оптимизации содержания и схемы введения гипса в ШПЦ и эффективном внедрении активных ММ в его составе взамен эквивалентной части шлака [5]. Так, установлено, что часть шлака в ШПЦ можно заменять активным минеральным модификатором (трепелом) в количестве не более 15 %, что улучшает свойства МЦ. Некоторые исследователи [6] считают, что при замене шлака другими ММ их следует использовать в количестве не более 10 %, то есть проблема вещественного состава и оптимального содержания шлака в ШПЦ требует дальнейшего развития.

Анализируя вопрос о необходимой дисперсности использования шлака в составе МЦС следует отметить, что проводимые исследования касались в основном выбора рациональных схем помола, которые положены в основе рекомендаций по получению ШПЦ с относительно высокой прочностью на ранней стадии твердения. Установлено, что двухстадийный помол с предварительным измельчением клинкерного компонента и накоплении его частиц в тонких фракциях обеспечивает более высокую прочность ШПЦ в ранние сроки твердения [5]. Однако, для ШПЦ с высоким содержанием шлака (17-43 % клинкера, 52-78 % шлака и 5 % гипса) дисперсность клинкерного компонента оказывает значимое влияние в основном на прочность в ранние сроки твердения, а в более поздние сроки (28-180 суток) его прочность в большей степени зависит от тонкости помола шлака. При этом необходимо учитывать, что дисперсность компонентов ШПЦ влияет не только на прочность МЦ, но и на деформативные и другие его свойства. Так, отмечается, что чрезмерное увеличение дисперсности шлака, входящего в ШПЦ, приводит к увеличению усадки цементного камня и бетона. Установлено, что тонкий помол клинкерного компонента при грубодисперсном шлаке практически не влияет на величину линейных деформаций, а при совместном помоле усадка ШПЦ оказывается меньше, чем при раздельном помоле [2].

Также авторами показано, что наиболее стабильную и прочную гидратную структуру образует фракция ШПЦ 0,1-20 мкм, то есть единое мнение о необходимой дисперсности использования шлакового и клинкерного компонентов, обеспечивающих получение высокопрочного ШПЦ, обладающего заданными свойствами, в настоящее время отсутствует [7]. Следует отметить, что ШПЦ обладает несколько замедленным набором прочности и поэтому ГОСТ 10178 предусматривает выпуск максимальной марки портландцемента 600, а ШПЦ 500, то есть на марку ниже. Поэтому в работах некоторых исследователей отмечается, что строители не охотно используют ШПЦ и при возможности выбора отдают предпочтение портландцементам с ММ той же марки. Это объясняется нестабильностью свойств ШПЦ, а также более медленным темпом его твердения, которые связываются со свойствами клинкера и шлака, их химико-минералогическими взаимосвязями при твердении, количественным соотношением компонентов.

При этом отмечается, что имеется мнение о необходимости применения рядовых ШПЦ при ТО изделий даже несмотря на необходимость увеличения ее продолжительности на 2 ч и повышения температуры изотермического прогрева до 90-95 °С, что увеличивает энергетические затраты на 9 кг у.т. на 1 м³ бетона. Предпочтение для изготовления изделий сборного железобетона отдается ШПЦ в виду того, что он является наиболее экономичным по энергозатратам относительно бездобавочного портландцемента (расходы энергии при производстве ШПЦ на 97-117 кг у.т. ниже).

В литературе отмечается, что для успешного использования ШПЦ в строительной индустрии необходимо повышение его качества и в первую очередь повышение активности при пропаривании до 25 МПа [9], то есть получение высокопрочного ШПЦ или использования шлаков в бетоне без снижения прочности чистоклинкерного цемента является одной из основных проблем современной строительной науки.

Исследованиями последних лет отмечается, что высокопрочные и долговечные бетоны с тонкомолотым шлаком возможно получать при оптимизации дисперсного состава МЦС, оптимальном содержании шлака и применении суперпластификаторов.

Целесообразно отметить, что ШПЦ в большинстве случаев характеризуются относительно низкой водопотребностью, позволяющей приготавливать бетонные смеси с меньшим содержанием воды (на 15-20 л на 1 м³). По сравнению с портландцементом ШПЦ имеет повышенную прочность на изгиб и растяжение и позволяет получать бетон с низкой ползучестью, а в некоторых случаях и с необходимой морозостойкостью. Однако, наиболее высокие СТС ШПЦ и бетона на его основе достигаются только при оптимальных параметрах (дисперсность, содержание) шлака и эффективных условиях твердения. При этом следует отметить, что процесс твердения ШПЦ, как и пуццоланового портландцемента, двухстадийный и любое нарушение условий, обеспечивающих процессы каждой стадии, приводит к резкому снижению технических свойств цементного камня [10]. Кроме того, значимое влияние на свойства бетона на основе ШПЦ оказывает технология приготовления бетонных смесей. Так, при необеспечении её оптимальных режимов значительно повышается ползучесть и снижается морозостойкость бетона. Однако качественное приготовление бетонной смеси с использованием ШПЦ обеспечивает получение бетонов со свойствами, позволяющими рекомендовать его для самых ответственных сооружений (пролетных строений мостов, тоннелей метрополитенов, дорожных и аэродромных плит, набивных и забивных свай, сборных свайных ростверков) [4].

Более высокий эффект получается при ТО изделий, который обусловлен связыванием гидроксида кальция минералами шлака, и сопровождается снижением pH жидкой фазы бетона, что позволяет предположить об ухудшении защитных свойств бетона по отношению к арматуре. Однако, по имеющимся опытным и практическим данным ШПЦ в бетонных конструкциях не вызывает коррозии арматуры [5].

Кроме ШПЦ, имеются его разновидности – быстротвердеющий и шлаковый магнезиальный. Быстротвердеющий ШПЦ содержит до 50 % шлака и измельчается до дисперсности 400-450 м²/кг. Бетоны, приготовленные с использованием такого вида цемента, отличаются быстрым нарастанием прочности, но характеризуются низкой морозостойкостью [5].

Несмотря на ряд имеющихся недостатков ШПЦ необходимо отметить постоянное расширение областей его применения в строительстве. Этот вид цемента, но с пониженным содержанием шлака, применялся в массовом строительстве (на Каховской и Красноярской ГЭС, в сооружениях черной металлургии), где были организованы вместе с установками по

гранулированию шлакового расплава и собственные помольные установки, а также широко используется в строительной индустрии.

Широкий опыт применения ШПЦ известен и из зарубежной практики (например, строительство плотины Бор во Франции осуществлено полностью из шлакового цемента). При этом французские стандарты разрешают введение в состав цемента до 35 % ММ – доменных гранулированных шлаков, золы-унос и др. В настоящее время Франция производит лишь 22 % бездобавочного цемента, при выпуске цемента с максимально разрешенным содержанием ММ 35 % в объеме 2,5 %. Основная масса цемента выпускается с содержанием ММ менее 20 %. Повышенное содержание ММ в цементе считается нецелесообразным ввиду увеличения продолжительности ТО бетона изделий, а также удлинения сроков строительства зданий из-за более медленной оборачиваемости опалубки и оснастки и т. д. [7].

Массовое применение получил доменный гранулированный шлак в Китае. Из 55 млн т отходов шлака 80 % гранулируется и используется для производства цемента, а отвальной шлак используется в дорожном строительстве [9].

Известно использование шлаков в производстве цемента в НРБ, где освоено также производство сульфатно-шлакового цемента на базе фосфатного шлака [9].

Высокий уровень использования металлургических шлаков отмечается в Японии, который уже в 1983 году увеличился с 65 до 90 %, при их ежегодном выходе 40 млн т. При этом значительные объемы шлака применяются в производстве цемента [9].

Проводятся лабораторные исследования по использованию доменного гранулированного шлака при производстве полутяжелых (240-480 кг/м³) бетонов в Канаде, которыми установлена возможность замены цемента до 65 %. Широкие исследования, выполненные в США, также показали высокую эффективность применения шлака в составе цемента и обозначили тенденцию к расширению производства современных видов многокомпонентных цементов [9].

Значительное количество ШПЦ производится в ФРГ, который используется даже в ответственных предварительно напряженных конструкциях. Одним из наиболее современных сооружений из шлакового цемента является мост из предварительно-напряженного бетона на Рейне [9].

Анализ проблемы использования доменных гранулированных шлаков в производстве вяжущих веществ или в бетоне показал, что основным вопросом, сдерживающим их применение, является более низкая прочность цемента и бетона со шлаком относительно бездобавочных составов.

Наиболее эффективным способом повышения прочности шлаковых МЦС является использование тонкодисперсного шлака с оптимальными параметрами (дисперсностью и содержанием), а также их сульфатно-щелочная активация, позволяющая получать высокопрочные цементы и бетоны. Однако, необходимо отметить, что производство шлакощелочных цементов и бетонов ввиду нестабильности их свойств и сложности технологии не получило массового внедрения. Поэтому дальнейшая разработка теоретических и практических рекомендаций по повышению эффективности использования тонкодисперсного доменного гранулированного шлака в производстве цемента и бетона является одной из наиболее актуальных и перспективных научных проблем в строительстве, имеющей экологическое значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баженов Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны: Научное издание / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. М.: АСВ, 2006. 368 с.
2. Пат. 201610796 Российская Федерация. Программа для моделирования хаотичной упаковки 2-фракционной смеси гранул / Белов В.В, Образцов И.В., Реунов А.Г.; заявитель и патентообладатель Тверской гос. тех. университет – №2009616803, зарегистрировано 25.01.10.
3. Исследование структуры пор в компьютерных моделях плотных и рыхлых упаковок сферических частиц / В.П. Волошин, Н.Н. Медведев, В.Б. Фенелонов, В.Н. Парман // Журнал структурной химии. 1999. Т. 40. №4. С. 46-60.
4. Берней И.И. Силы капиллярного сцепления и их влияние на технологию и свойства строительных материалов / И.И. Берней, В.В. Белов // Производство и применение асбестоцемента: Межвуз. научн. сб. – Калинин: КПИ, 1979. С. 3-44.
5. Миронов В.А. Оптимизирование композиций для изготовления строительных смесей: Научное издание / В.А. Миронов, В.В. Белов, А.И. Голубев, М.А. Смирнов. СПб: РИА «Квинтет», 2008. 416 с.
6. Баженов, Ю.М. Технология бетонов XXI века / Ю.М. Баженов // Новые научные направления строительного материаловедения: материалы докладов Академических чтений РААСН. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. – С. 9-19.
7. Хольшемахер, К. Технология и исследования производства ультравысокопрочного бетона UHFB / К. Хольшемахер, Ф. Ден // Международное бетонное производство. 2004. № 3. С. 28-34.
8. Калашников, В.И. Через рациональную реологию – в будущее бетонов. Ч. 2. Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Технологии бетонов. 2007. № 6. С. 8-11.
9. Рыжов, И.Н. Самоуплотняющиеся бетонные смеси. Производство и применение / И.Н. Рыжов, А.Н. Романов // Цемент. Бетон. Сухие строительные смеси. 2008. № 1. С. 71-77.
10. Белов, В.В. Оптимизирование композиций для изготовления прессованного мелкозернистого бетона / В.В. Белов // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук: периодич. науч. издание. Воронеж – Тверь: РААСН. ТГТУ, 2007. Вып. 6. С. 27-35.

Tsipursky Ilya Lazarevich

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia
E-mail: Vatralla.m1@gmail.com

Kokonova Aidai Abdyl daevna

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia
E-mail: Vatralla.m1@gmail.com

Danilova Elena Dmitrievna

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia
E-mail: Vatralla.m1@gmail.com

Kovchenko Ilya Vladimirovich

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia
E-mail: Vatralla.m1@gmail.com

Rudenko Maxim Igorevich

Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia
E-mail: rrudenko.maksim@yandex.ru

Domain granulated slag in the production of multicomponent cement systems: production technology and application features

Abstract. The article discusses the features of the technology of production and use of granulated blast furnace slag in the production of multi-component cement systems. The development of housing, civil and industrial construction in Russia at the present stage is associated with improving the quality, bringing it closer to the European and reducing the cost of construction materials, the most priority of which are concrete and reinforced concrete. Multi-component cement systems, which is one of the most promising areas, is a significant factor in reducing the energy intensity and cost of concrete and reinforced concrete and giving them special properties. It is known that the average specific energy consumption for cement is 60-200, and for dense aggregates – 4.3-6.8 kg t/m³. Therefore, the reduction of cement consumption in concrete through the use of MM with a lower (several times) energy consumption and cost is an effective technological technique in the technical and economic aspect. The author comes to the conclusion that the analysis of the problem domain the use of granulated slag in the production of binders or in the concrete showed that the main issue hindering their use, is to lower the strength of cement and concrete with slag of relatively clear formulations. The most effective way to increase the strength of slag MCC is the use of fine slag with optimal parameters (dispersion and content), as well as their sulphate-alkaline activation, which allows to obtain high-strength cements and concretes. that the production of cements and concretes due to the instability of their properties and the complexity of the technology has not received a mass introduction. Therefore, the further development of theoretical and practical recommendations to improve the efficiency of the use of fine-grained blast furnace slag in the production of cement and concrete is one of the most urgent and promising scientific problems in construction, which has environmental importance.

Keywords: blast-furnace granulated slags; multicomponent cement systems; application problems; cement; construction; reinforced concrete; energy intensity

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. (2006). Modificirovannye vysokokachestvennye betony: Nauchnoe izdanie. [*Modified high-quality concrete: Scientific edition.*] Moscow: ASB, p. 368.
2. Belov V.V., Obrazcov I.V., Reunov A.G. (2010). Programma dlya modelirovaniya haotichnoj upakovki 2-frakcionnoj smesi granul. [*Program for modeling chaotic packing of a 2-fraction mixture of granules.*] Tver: Tver state. those. University – №2009616803.
3. Voloshin V.P., Medvedev N.N., Fenelonov V.B., Parman V.N. (1999.) Investigation of the structure of pores in computer models of dense and loose packages of spherical particles. *Journal of Structural Chemistry*, 4(40), pp. 46-60. (in Russian).
4. Bernej I.I., Belov V.V. (1979). The forces of capillary coupling and their influence on the technology and properties of building materials. *Production and application of asbestos cement*, pp. 3-44. (in Russian).
5. Mironov V.A., Belov V.V., Golubev A.I., Smirnov M.A. (2008). Optimizirovanie kompozicij dlya izgotovleniya stroitelnyh smesey: Nauchnoe izdanie. [*Optimization of compositions for the manufacture of building mixtures: Scientific publication.*] Saint Petersburg: RIA "Quintel", p 416.
6. Bazhenov Yu.M. (2005). Technology of concrete of the XXI century. *Publishing house BSTU. V.G. Shukhov*, pp. 9-19. (in Russian).
7. Holshemaher K., Den F. (2004). Technology and research of production of ultrahigh-strength concrete UHFB. *International Concrete Production*, 3, pp. 28-34. (in Russian).
8. Kalashnikov V.I. (2007). Through rational rheology – into the future of concrete. Part 2. Thin-dispersed rheological matrices and powdered concrete of a new generation. *Concrete Technology*, 6, pp. 8-11. (in Russian).
9. Ryzhov I.N., Romanov A.N. (2008). Self-sealing concrete mixes. Production and application. *Cement. Concrete. Dry mixes*, 1, pp. 71-77. (in Russian).
10. Belov V.V. (2007). Optimizirovanie kompozicij dlya izgotovleniya pressovannogo melkozernistogo betona. [*Optimization of compositions for manufacturing compacted fine-grained concrete.*] Voronezh-Tver: RAASN. TGTU, pp. 27-35.