

государственный технический университет», Тверь. E-mail: smivvv321@gmail.com

ЧУРИЛИН Иван Дмитриевич – студент кафедры производства строительных изделий и конструкций, ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Тверь. E-mail: fir.man2018@yandex.ru

About the authors:

TROFIMOV Valery Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production of Building Products and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: vitrofa@mail.ru

SMIRNOV Matvey Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Products and Structures Production, Tver State Technical University, Tver. E-mail: matiu.sm@yandex.ru

LAKISOV Ilya Evgenievich – Student of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: lakiso1@bk.ru

SMIRNOV Alexander Gennadievich – Student of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: smivvv321@gmail.com

CHURILIN Ivan Dmitrievich – Student of the Department of Production of Building Materials and Structures, Tver State Technical University, Tver. E-mail: fir.man2018@yandex.ru

УДК 691.3

**ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАОЛИНА,
ДОЛОМИТОВОГО ПОРОШКА, МИКРОКРЕМНЕЗЕМА,
ПЕРЕРАБОТАННОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО
ДОМЕННОГО ШЛАКА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БЕТОНА
ДЛЯ КОНСТРУКЦИИ ТОННЕЛЕЙ**

Г.А. Шусев, Е.В. Ткач

© Шусев Г.А., Ткач Е.В., 2024

Аннотация. В статье проанализированы положительные эффекты, возникающие при использовании в производстве бетона таких веществ, как каолин, доломитовый порошок, микрокремнезем, переработанный гранулированный доменный шлак, с точки зрения

улучшения физико-механических параметров бетона, повышения стойкости к коррозии, снижения негативных экологических последствий для конструкций тоннелей.

Ключевые слова: *коррозионнотойкие замещающие добавки, микрокремнезем, переработанный гранулированный доменный шлак, каолин, доломитовый порошок.*

Введение

Железобетон часто используется в строительстве в качестве конструкционного материала из-за его высокой прочности на сжатие и низкой стоимости. Однако некоторые агрессивные вещества приводят к разрушению стальной арматуры, цемента и бетона [7]. Одной из важнейших проблем является коррозия стальных стержней в железобетонных конструкциях. Кроме того, техническое обслуживание и ремонт железобетонных конструкций тоннелей, связанные с коррозией, весьма затратны. В целях снижения стоимости ремонта необходимо повышать долговечность арматурных стержней, особенно подвергающихся воздействию агрессивных (в том числе морских) сред, увеличивать продолжительность срока службы бетона, эксплуатируемого в сложных условиях [8]. Исследователи пытались добиться снижения скорости коррозии с помощью использования различных сталей арматуры, ингибиторов коррозии, путем замены портландцемента другими материалами, изучали влияние различных сред [13]. Защита от коррозии закладной стали в бетоне осуществляется двумя способами: физическим и химическим. Физическую защиту обеспечивает покрытие бетона, предотвращающее разрушение поверхности стали, химическую – раствор с высоким рН в порах бетона, который вызывает пассивацию стали. На современном этапе значительное число исследований посвящено использованию добавок для увеличения устойчивости бетонных конструкций к коррозии. Типичными примерами подобных добавок являются микрокремнезем, нитрит кальция, доменный шлак, гидроксикаламина и монофторфосфат натрия [10]. Они способствуют росту плотности бетона, уменьшают его проницаемость, ограничивают поток ионов, повышают электрическое сопротивление и замедляют процесс коррозии. Установлено, что дополнительные вяжущие материалы снижают проникновение хлоридов и пористость [16]. Введение данных материалов в бетонную смесь уменьшает капиллярные поры бетона и повышает его непроницаемость [14]. Проведены многочисленные исследования по улучшению железобетона различными видами добавок, что позволило повысить его химическую стойкость и механические свойства.

Кроме того, использование побочных продуктов промышленности и переработка отходов имеют большое значение для снижения негативного воздействия на окружающую среду при производстве бетона и его эксплуатации в конструкциях тоннелей.

Основная часть. Одной из коррозионностойких замещающих добавок является микрокремнезем – побочный продукт производства кремния и ферросилициевых сплавов с содержанием аморфного кремнезема. Средний диаметр частиц примерно в сто раз меньше, чем у частиц портландцемента. При этом его удельная поверхность составляет около 300–13 000 м²/кг, что чрезвычайно много по сравнению с портландцементом с плотностью 300–400 м²/кг [1].

Микрокремнезем реагирует двумя способами при добавлении в свежий бетон. В пуццолановой реакции он обычно вступает в химическую реакцию с гидроксидом кальция, образуя дополнительное количество гидратированного силиката кальция, который отвечает за стойкость бетона. Кроме того, возникает эффект наполнителя (эффект микронаполнителя), когда поры смеси заполняются очень мелкими частицами примеси [2]. По этим причинам введение микрокремнезема в портландцемент может уменьшить пористость и повысить прочность и долговечность бетона [9].

Вода может проникать за счет капиллярного действия. Поскольку микрокремнезем уменьшает пористость, в железобетон впитывается меньше воды, что ведет к улучшению коррозионной стойкости.

Доломит – это карбонатная осадочная порода с высоким содержанием карбоната, а также с механическими свойствами, подобными свойствам известняка. Доломит используется в производстве стекла, печей и стали. Он тверже и доступнее, чем известняк, и его можно применять при производстве бетона как отличный строительный материал. Прочность сцепления бетона увеличивается при добавлении в качестве наполнителей микрокремнезема или летучей золы вместе с доломитовым порошком [6]. Исследовано влияние добавки различных комбинаций микрокремнезема и доломитового порошка в обычный портландцемент на коррозионное поведение железобетона, армированного углеродистой сталью. Для получения данных электрохимической коррозии использовали электрохимическую импедансную спектроскопию и поляризационный анализ в 3,5%-м растворе NaCl. Морфологию образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии, а также изучали их сродство к воде по отношению к различным сочетаниям компонентов. Наибольшая коррозионная стойкость была достигнута для смеси с микрокремнеземом (40 кг/м³) и доломитовым порошком (80 кг/м³) в обычном портландцементе. Измерения поляризации также показали, что при использовании данной смеси скорость коррозии была самой низкой, а коррозионный потенциал – наиболее высоким с эффективностью

ингибирования коррозии $\eta = 94 \%$. Результаты электрохимических измерений и водопоглощения показывают, что минеральные добавки повышают долговечность бетона, подвергающегося воздействию коррозионных агентов, предотвращая попадание агрессивных ионов на поверхность стержней из углеродистой стали.

Добавление каолина позволяет уменьшить физические и механические ограничения железобетона и расширить спектр его применения [5].

Каолин способен улучшать удельное электрическое сопротивление и уменьшать проницаемость и удельную поверхность материала.

Влияние добавки каолина для частичной замены обычного портландцемента на коррозионную стойкость арматуры из дуплексной нержавеющей стали исследовалось с помощью потенциала разомкнутой цепи, электрохимической импедансной спектроскопии и поляризационного анализа после погружения образцов в морскую среду. Согласно результатам электрохимических исследований, наиболее высокую коррозионную стойкость и потенциал имел образец с каолином. Морфология поверхности образцов показала, что за счет добавления каолина на поверхности железобетона образовалось лишь небольшое количество продуктов коррозии. Это может быть связано с уменьшением содержания хлорид-ионов и водопроницаемости железобетона. Большие поры могут быть преобразованы в более мелкие за счет добавления каолина, вызывающего изменение структуры цементного теста. Добавление каолина приводит к преобразованию больших пор в более мелкие вследствие изменения структуры цементного теста, а также снижает скорость коррозии и повышает коррозионную стойкость стальной арматуры. Результаты показывают, что каолин в качестве добавки повышает долговечность бетона и предотвращает попадание коррозионных ионов на поверхность металлической арматуры, которая может стать альтернативным материалом в строительной индустрии.

Использование побочных продуктов промышленности и переработка материалов имеют большое значение для снижения воздействия на окружающую среду. В результате производства стали образуется стальной шлак, который имеет сложную структуру, состоящую из силикатов и оксидов и затвердевающую при охлаждении. В процессе производства стали образуется несколько различных типов стального шлака: нагревательный (чеканный) шлак, инженерный шлак, огарок и карьерный шлак (шлак очистки). В настоящее время стальной шлак используется в значительных масштабах в КНР для производства цемента и бетона [3]. Основные минеральные фазы в шлаке ковша электродуговой печи – портландит, майенит и малентерит. Рентгеноструктурный анализ как кислородно-конвертерной печи, так и шлака ковша электродуговой печи показал наличие свободных оксидов магния и оксидов кальция [4]. Время

схватывания и водопоглощение бетона, изготовленного из стального шлака и портландцемента, и бетона, изготовленного только из портландцемента, аналогично. Использование стального шлака целесообразно и в силу более низкой стоимости материала [15].

Переработанный гранулированный доменный шлак представляет собой более мелкий порошок гранулированного молотого доменного шлака, известный также как Alccofine [11]. Достоинствами переработанного гранулированного доменного шлака являются большая площадь поверхности и высокая устойчивость к химическому воздействию. Переработанный гранулированный доменный шлак не увеличивает потребность в воде при дозировке от 5 до 15 % обычного портландцемента. Осадка бетона уменьшается за счет плотной упаковки вяжущего материала, обеспечивающей низкое содержание пустот. Использование переработанного гранулированного доменного шлака приводит к образованию гидратированной цементной матрицы, состоящей из микроскопических пор. Переработанный гранулированный доменный шлак представляет собой уникальный продукт, обладающий высокой реакционной способностью, достигаемой за счет контролируемой грануляции.

Переработанный гранулированный доменный шлак можно применять в качестве водоредуцирующего средства для улучшения прочности на сжатие или более высокой обрабатываемости, улучшения текучести. Преимущества указанного материала проявляются в составе бетонной смеси. Использование указанного материала повышает свойства свежего и затвердевшего бетона, а также обеспечивает более высокую плотность упаковки частиц геополимерного бетона на основе летучей золы [12]. Материал существенно влияет на механические и микроструктурные свойства геополимерного бетона на основе летучей золы. Более высокая удельная поверхность способствует более высокой гидратации и пуццолановой реакции. Кроме того, переработанный гранулированный доменный шлак обеспечивает равномерное смешивание и улучшает удобоукладываемость и консистенцию бетона, повышает прочность на сжатие и долговечность.

Заключение

На основе анализа положительных эффектов, возникающих при использовании в производстве бетона таких веществ, как каолин, доломитовый порошок, микрокремнезем, переработанный гранулированный доменный шлак, с позиций улучшения физико-механических параметров, повышения стойкости к коррозии, снижения негативных экологических последствий необходимо отметить следующее:

1. Прочность сцепления бетона увеличивается при добавлении микрокремнезема или летучей золы вместе с доломитовым порошком в качестве наполнителей.

2. Добавление каолина является важным подходом, который позволяет уменьшить физические и механические ограничения железобетона и расширить спектр их применения. Каолин в качестве добавки повышает долговечность бетона и предотвращает попадание коррозионных ионов на поверхность металлической арматуры, которая может стать альтернативным материалом для развития строительной индустрии.

3. Использование побочных продуктов промышленности и переработка материалов имеют большое значение для снижения воздействия на окружающую среду и устойчивого развития. В результате производства стали образуется стальной шлак. Время схватывания и водопоглощение бетона, изготовленного из стального шлака и портландцемента, и бетона, изготовленного только из портландцемента, аналогично, но шлак обеспечивает большую прочность на сжатие.

Переработанный гранулированный доменный шлак можно использовать в качестве водоредуцирующего средства для улучшения прочности на сжатие или более высокой обрабатываемости, улучшения текучести.

Библиографический список

1. Corrosion resistance evaluation of rebars with various primers and coatings in concrete modified with different additives / Alireza Afshar, Soheil Jahandari, Haleh Rasekh, Mahdi Shariati, Abdollah Afshar, Ali Shokrgozar // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 262.

2. Influence of silica fume addition on concretes physical properties and on corrosion behaviour of reinforcement bars / J. Dotto [et al.] // *Cement and Concrete Composites*. 2004. Vol. 26, pp. 31–39.

3. An Overview of Utilization of Steel Slag / H. Yi [et al.] // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. Vol. 16, pp. 791–801.

4. Yildirim I.Z., Prezzi M. Chemical, mineralogical, and morphological properties of steel slag // *Advances in Civil Engineering*. 2010. Vol. 2011, pp. 1687-8086.

5. Sheng P., Wang D., Yu G. Effect of kaolin addition on electrochemical corrosion resistance of duplex 2205 stainless steel embedded in concrete exposed in marine environment // *International Journal of Electrochemical Science*. 2020. Vol. 15, Iss. 12, pp. 11732–11741.

6. Kamal M.M., Safan M.A., Al-Gazzar M.A. Steel-concrete bond potentials in self-compacting concrete mixes incorporating dolomite powder // *Advances in concrete construction*. 2013. Vol. 1 (4).

7. Corrosion of steel reinforcement in hydrophobized concrete under the influence of aggressive chloride-containing medium / V. Rummyantseva [et al.] // *Journal of Sustainable Development*. 2018. Vol. 10.

8. Kashi A., Ramezaniapour A.A., Moodi F. Durability evaluation of retrofitted corroded reinforced concrete columns with FRP sheets in marine environmental conditions // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 151, pp. 520–533.

9. Ramamurthy K., Kunhanandan Nambiar E.K., Ranjani Gandhi I.S. A classification of studies on properties of foam concrete // Cement and Concrete Composites. 2009. Vol. 31(6), pp. 388–396.

10. A new approach for application of silica fume in concrete: Wet granulation / K.S. Motahari [et al.] // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 157, pp. 573-581.

11. Girish Kumar M., Mini K.M., Murali Rangarajan. Ultrafine GGBS and calcium nitrate as concrete admixtures for improved mechanical properties and corrosion resistance // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 182, pp. 249–257.

12. Effects of alccofine and curing conditions on properties of low calcium fly ash-based geopolymers / S. Arora [et al.] // Materials Today Proceedings. 2020. Vol. 32 (4), pp. 620–625.

13. Electrochemical evaluation of a stainless steel as reinforcement in sustainable concrete exposed to chlorides / G. Santiago-Hurtado [et al.] // Int. J. Electrochem. Sci. 2016. Vol. 11, pp. 2994–3006.

14. Skibsted J., Snellings R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends // Cement and Concrete Research. 2019. № 124.

15. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production / P.E. Tsakiridis [et al.] // J. Hazardous Mater. 2008. Vol. 152, pp. 805–811.

16. Compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete under cyclic loading / X. Hu [et al.] // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 193, pp. 72–83.

THE POSSIBILITIES OF USING KAOLIN, DOLOMITE POWDER, MICROSILICON, RECYCLED GRANULAR BLAST FURNACE SLAG IN THE PRODUCTION OF CONCRETE FOR TUNNEL CONSTRUCTION

G.A. Shusev, E.V. Tkach

***Abstract.** The article analyzes the positive effects arising from the use of substances such as kaolin, dolomite powder, silica, recycled granular blast furnace slag in concrete production in terms of improving the physical and mechanical parameters of concrete, increasing corrosion resistance, and reducing negative environmental consequences for tunnel structures.*

Keywords: *corrosion-resistant replacement additives, silica, recycled granular blast furnace slag, kaolin, dolomite powder.*

Об авторах:

ШУСЕВ Георгий Александрович – аспирант, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва. E-mail: shusev.madi@yandex.ru

ТКАЧ Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва. E-mail: ev_tkach@mail.ru

About the authors:

SHUSEV George Alexandrovich – Postgraduate Student, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow. E-mail: shusev.madi@yandex.ru

TKACH Evgeniya Vladimirovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow. E-mail: ev_tkach@mail.ru

УДК 622.331:553.04

ОБЗОР ИТ-ПРОДУКТОВ ДЛЯ ГОРНЫХ КОМПАНИЙ

Т.Б. Яконовская

© Яконовская Т.Б., 2024

***Аннотация.** В статье приведен обзор рынка программных продуктов (геоинформационных систем) для предприятий горнодобывающего сектора национальной экономики РФ. Показано, что российские разработки геоинформационных систем способны заменить иностранное программное обеспечение для большинства горных компаний. Приведены примеры программных решений.*

***Ключевые слова:** ИТ-продукты, геоинформационные системы, горные компании, отраслевая стратегия, инвестиционные программы.*

Успешное функционирование горнодобывающей компании в немалой степени зависит от наличия в ее арсенале эффективных информационно-технологических решений, которые будут учитывать индивидуальные задачи и особенности работы предприятия горнорудной промышленности. Любая из сфер, будь то добыча торфа, угля,