

## ВЛИЯНИЕ АМД НА УСАДОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА

*Работа посвящена актуальной проблеме снижения усадочных деформаций бетона и расширению области применения активных минеральных добавок (АМД).*

*Проведен анализ литературных источников по теме исследования. Для многих предприятий на протяжении длительного времени актуальной задачей является разработка прогрессивных технологий, обеспечивающих рециклинг производственных процессов, повышение эффективности использования сырья и снижение затрат на производство. Добиться одновременного повышения качества бетона и снизить затраты на производство возможно за счет применения АМД.*

*Данной тематике на сегодняшний день посвящено достаточно обширное количество исследований как российских, так и иностранных ученых. Поскольку утилизация отходов и снижение выбросов углекислого газа в атмосферу является важной стратегической задачей современной экологии.*

*Применение в строительном производстве отходов промышленности позволит утилизировать шлак, приведет к увеличению ассортимента продукции и улучшению экологической обстановки.*

*Однако существуют проблемы, связанные с повышением водопоглощения и увеличением усадки бетона на основе цемента модифицированного доменным гранулированным шлаком (ДГШ), связанные, прежде всего, с изменением свойств бетонной смеси, а также структуры и фазообразования бетона.*

*Таким образом, целью данной работы стало проведение анализа существующей проблематики применения АМД для снижения усадочных деформаций бетона и выявление направления снижения экологических рисков, возникающих в результате нерационального и некачественного их использования.*

*В данной работе выявлены основные причины возникновения усадочных деформаций бетона. Сформулирована основная цель и задачи исследования. Предложен метод активации твердения бетона, на основе которого разработан бетон на шлакопортландцементе (ШПЦ) с высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками.*

*Приведены результаты влияния активных минеральных добавок на прочность и ранние усадочные деформации цементного камня бетона на основе шлакопортландцемента.*

**Ключевые слова:** добавки, шлакопортландцемент, метакаолин, гипс, бетон, строительные материалы, рециклинг, экология.

## INFLUENCE OF AMA ON CONCRETE SHRINKAGE

*The work is devoted to the actual problem of reducing the shrinkage deformations of concrete and expanding the application of active mineral additives (AMA).*

*The analysis of literature sources on the topic of research is carried out. For many enterprises for a long time the actual problem is the development of progressive technologies providing recycling of production processes, increase of efficiency of raw materials use and decrease in manufacturing costs. It is possible to achieve simultaneous improvement of concrete quality and reduce production costs through the use of AMA.*

*To date, a fairly extensive number of studies by both Russian and foreign scientists have been devoted to this topic. Since the disposal of waste and the reduction of carbon dioxide emissions into the atmosphere is an important strategic task of modern ecology.*

*The use of industrial waste in the construction industry will allow to utilize slag, will lead to an increase in the range of products and improve the environmental situation.*

*However, there are problems associated with increased water absorption and increased shrinkage of concrete based on cement modified blast-furnace slag, associated primarily with a change in the properties of the concrete mixture, as well as the structure and phase formation of concrete.*

*Thus, the purpose of this work was to analyze the existing problems of AMA application to reduce the shrinkage deformation of concrete and to identify the direction of reducing environmental risks arising from the irrational and poor quality of their use.*

*In this paper, the main causes of shrinkage deformations in concrete have been identified. The main goal and objectives of the study are formulated. The method of concrete hardening activation on the basis of which the concrete on the slag-portland cement with high technological and operational characteristics is offered.*

*The results of the influence of active mineral additives on the strength and early shrinkage of concrete on the basis of slag-portland cement.*

**Keywords:** *additives, portland slag cement, metakaolin, gypsum, concrete, building materials, recycling, ecology.*

Снижение влияния производственных рисков с целью сохранения невозполнимых природных ресурсов является глобальной задачей и в нашей стране. Одним из вариантов её решения – это продуктивное использование отходов промышленности как в технологиях безотходного производства в рамках производственного рециклинга, так и в процессе применения вторичных отходов на предприятиях других отраслей экономики.

Современная строительная индустрия предлагает достаточно большое разнообразие бетона и изделий из него, которые имеют существенные различия, в том числе в условиях эксплуатации, что в значительной степени обуславливает необходимость повышения прочности и долговечности бетонов.

Повышение прочности бетона приведет к снижению сечения конструкции при обеспечении ее эквивалентной несущей способности. Однако, получение высокопрочных бетонов часто сопровождается увеличением их усадочных деформаций и снижением трещиностойкости. Повышение трещинообразования приведет к снижению проницаемости и долговечности бетона, и как следствие одновременного ухудшения деформативных свойств [1,2].

Различают влажностную, карбонизационную и контракционную усадки бетона, наименее изученной из которых остается влажностная, которая и вызывает основную деформацию бетона [3,4].

В соответствии со временем возникновения усадка бывает пластическая (капилляр-

ная), аутогенная, усадка при высыхании.

Усадка бетона происходит наиболее интенсивно в начальный период твердения, и зависит, прежде всего, от вида применяемого цемента, его расхода и тонкости помола, а также водоцементного соотношения. Соответственно наиболее интенсивно усадочные деформации возникают в бетоне с большим расходом цемента и воды затворения, а также при низкой влажности окружающей среды [3,4].

Согласно современным представлениям, усадка бетона обусловлена совместным действием капиллярных сил и сил, возникающих при удалении воды из слоев, образованных между кристаллами новообразований цементного камня [3,4].

Многими исследователями было показано, что одним из эффективных методов снижения усадочных деформаций бетона является создание направленной структуры и фазообразования, за счет введения добавок-модификаторов, включающих сульфат-ионы и алюминаты, позволяющие формировать различные модификации гидросульфатоалюмината кальция [3-6].

Таким образом, целью работы является исследование влияния минеральных добавок различной природы на трещиностойкость высокопрочных бетонов.

Задачей проведения данного исследования стало определение усадочных деформаций бетона с момента затворения и начала протекания процесса гидратации и прочности на изгиб и на сжатие согласно требо-

ваниям нормативной документации [7,8]. Исследования проводили на цементе класса ЦЕМ II / В-Ш 42,5 Н по ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия», ОАО «Сухоложскцемент» при температуре 20±50С и влажности 65-70%. Суперпластификатор вводили в дозировке 0,6% от массы цемента для снижения расхода воды затворения. Метакаолин производства ЗАО «Пласт-Рифей» соответствующий ТУ 5729-095-51460677-2009, СП-1 производства ОАО «Полипласт» г. Новомосковск ТУ 5870-005-58042865-05, гипс ГВВС-16, производства ЗАО «Самарский гипсовый комбинат» г. Самара.

Испытаний проводили с помощью комплекта приборов для измерения усадки «SchwindmessgerätTypВ». Данные исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Влияние добавок на ранние усадочные деформации цементного камня бетона**

| № состава | Гипс, % | МТК, % | Деформация усадки, мм/м |         |         |         |
|-----------|---------|--------|-------------------------|---------|---------|---------|
|           |         |        | 12 часов                | 1 сутки | 2 сутки | 3 сутки |
| 1         | 0       | 0      | 1,86                    | 2,89    | 5,59    | 8,25    |
| 2         | 0       | 3      | 0,3                     | 0,64    | 0,95    | 1,25    |
| 3         | 0       | 10     | 1,02                    | 1,98    | 2,9     | 3,86    |
| 4         | 5       | 10     | 0,09                    | 0,13    | 0,27    | 0,36    |
| 5         | 10      | 10     | 0,02                    | 0,0425  | 0,188   | 0,315   |
| 6         | 10      | 3      | 0,16                    | 0,2     | 0,29    | 0,4     |
| 7         | 10      | 0      | 1,21                    | 1,25    | 1,49    | 1,49    |
| 8         | 5       | 0      | 0,96                    | 1,8     | 2,75    | 3,65    |
| 9         | 5       | 3      | 0,089                   | 0,178   | 0,318   | 0,425   |

дет к снижению вероятности формирования этрингита.

Введение 5% гипса совместно с 3 и 10% метакаолина позволяет несколько изменить картину. При этом существенной разницы в усадке не наблюдается, что может быть связано с недостатком SO<sub>4</sub> в жидкой фазе.

А вот повышение дозировки гипса до 10% с одновременным увеличением метакаолина приводит к максимальному снижению усадочных деформаций цементного камня.

Результаты по усадке считывались каждые 15 минут, начиная с момента формирования до 3 суток твердения.

По результатам исследования (табл.1), можно сделать вывод о том, что в дозировке до 3 % метакаолин позволяет компенсировать возникающие сжимающие деформации в структуре цементного камня и несколько снижает его усадку. Тогда как увеличение дозировки метакаолина до 10% также способствует снижению усадки, по сравнению с контрольным образцом, но в меньшей степени. Что вероятно обусловлено снижением количества воды затворения, поскольку метакаолин дисперсная добавка и имеет повышенную влагоемкость [9-15].

Кроме того, такой результат может быть связан с созданием дефицита ионов кальция в присутствии 10% метакаолина, что приве-

Так же были проведены испытания на прочность образцов-балочек размером 4x4x16 см, изготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012. Образцы хранили в НУ. Из серии испытаний на цементном камне выбрали два оптимальных состава (5% гипса и 10% МТК; 5% гипса и 3% МТК) и контрольный состав. Результаты представлены на рисунке 1.

Выбранные составы позволяют повысить прочность бетона на сжатие и изгиб. Состав,

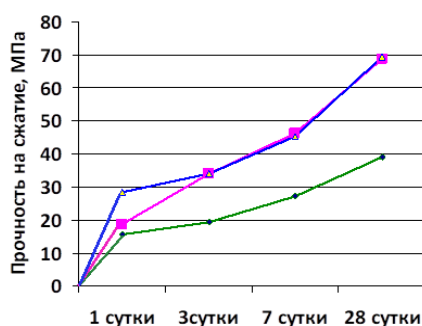
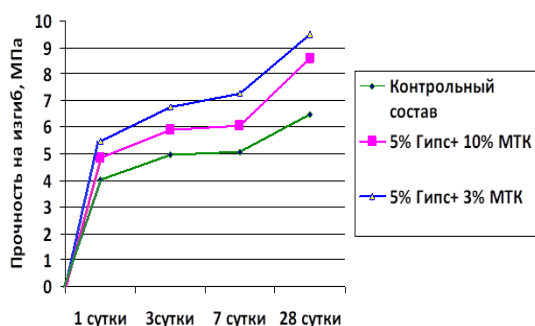


Рис. 1. Влияние добавок на прочность бетона

включающий 5% гипса и 10% МТК, повышает прочность бетона на изгиб на 30% и на 76% на сжатие в возрасте 28 суток твердения. Добавка, включающая 5% гипса и 3% МТК, позволяет в большей степени повысить прочность бетона на 46% на изгиб и на 78% на сжатие в возрасте 28 суток твердения, по сравнению с другим принятым оптимальным составом.

Все составы имеют усадочные деформации, что объясняется проведением исследований на цементном камне с большим расходом воды затворения. Однако по данным исследований можно сделать вывод о положительном влиянии метаксаолина как отдельно, так и в комплексе с гипсом. При этом наилучшие показатели снижения усадочных деформации цементного камня в присутствии метаксаолина получены с применением дозировки около 3% [16-25].

При совместном введении метаксаолина с гипсом максимальные результаты снижения усадочных деформаций получены с применением добавки «10%МТК+10%Гипса» и «10%МТК+5%Гипса». Следует отметить, что введение максимальной дозировки гипса и 3% метаксаолина привели к примерно одинаковому снижению усадочных деформации цементного камня.

#### Заключение

Производственные предприятия уже на протяжении многих десятилетий ставят перед собой задачу разработки прогрессивных технологий, обеспечивающих рециклинг

производственных процессов, повышение эффективности использования сырья и снижение затрат на производство. Создаются и успешно развиваются структуры экологического менеджмента. Обеспечивается конструктивное сотрудничество с рядом отечественных и зарубежных предприятий, разрабатываются и воплощаются стратегии повышения социальной ответственности производителей в сохранении экологии, и восполнения уже существующих затрат [11,16,17,24].

Таким образом, актуальность повышения эффективности использования шлакопортландцемента и расширение области его применения является бесспорной и на сегодняшний день весьма важной задачей научного поиска широкого круга учёных. Для решения данной задачи наиболее эффективно необходимо использовать активные минеральные добавки, которые позволят модернизировать свойства бетона на шлакопортландцементе.

В заключении необходимо отметить эффективность применения рассмотренных АМД на снижение ранних усадочных деформаций бетона и повышение его физико-механических характеристик.

Кроме того, можно выявить закономерность, связанную с тем, что совместное введение метаксаолина и гипса позволит существенно снизить усадочные деформации цементного камня, тогда как отдельное введение только гипса или метаксаолина менее эффективно.

### Литература

1. Михайлов В.В. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции [Текст] / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – Издательство: М.: Стройиздат. – 1974. – 312 с.
2. Кузнецова Т.В. Глиноземистый цемент [Текст] / Т.В. Кузнецова, Й. Талабер. – М.: Стройиздат, 1988. – 272 с.
3. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона [Текст]. Тбилиси: Мецниереба. – 1979. – 226 с.
4. Миненко Е.Ю. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. наук. 05.23.05 / Миненко Е.Ю.; МГГРУ. – Пенза., 2004. – 130 с.
5. Рамачандран В.С. Добавки в бетон. Справочное пособие [Текст] / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М.И. Колепарди и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
6. Кривобородов Ю.Р. Физико-химические свойства сульфатированных клинкеров [Текст] / Ю.Р. Кривобородов, С.В. Самченко // Аналитический обзор ВНИИЭСМ. – М.: 1991. – Серия 1. Цементная промышленность. – 55 с.
7. ГОСТ 24544-81 Бетоны. Методы определения деформации усадки и ползучести (с Изменением N 1) . – М.: Издательство стандартов. – 1987. – 18 с.
8. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М.: Стандартинформ. – 2021. – 31 с.
9. Добровольский, И.П. Переработка и утилизация промышленных отходов Челя-



- бинской области [Текст] / И.П. Добровольский, И.Я. Чернявкий, А.Н. Абызов, Ю.Е. Козлов. – Челябинск: изд. «ЗАО Челябинская межрайонная типография», 2003. – 256 с.
10. Панфилов, М.И. Переработка шлаков и безотходная технология в металлургии [Текст] / М.И. Панфилов, Я.Ш. Школьник, Н.В. Орининский, В.А. Коломиец, Ю.В. Сорокин, А.А. Грабеклис – М.: Металлургия, 1987. – 238 с.
11. Романова, И.П. Использование отходов металлургической промышленности в строительной индустрии как способ сбережения природных ресурсов и снижения экологической напряженности [Текст] / И.П. Романова, О.Б. Бегунов / Территория науки. – М., 2016. – № 2. – С. 94-99.
12. Ушеров-Маршак, А.В. Гранулированный доменный шлак [Текст] / Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков: Колорит, 2005. – С. 84-96.
13. Chen, Y.L. The Composite Effect of Mineral Additives to the Performances of Concrete / Y.L. Chen, W.L. You // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. – P. 289-301.
14. Кузнецова, Т.В. Активные минеральные добавки и их применение [Текст] / Т.В. Кузнецова, З.Б. Энтин, Б.С. Альбец, Л.Я. Гольдштейн, Н.В. Соколова, Е.Т. Яшина. – М.: Цемент, 1981. – №10. – С. 6-8.
15. Swamy, R. N. Role and effectiveness of mineral admixtures in relation to alkali-silica reaction / R. N. Swamy // The alkali-silica reaction in concrete. Glasgow and London: Blackie and Son Ltd, 1992. - P. 144 - 170.
16. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности [Текст] / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – М.: Феникс, 2007. – 368с.
17. Романов, П.С. Рециклинг отходов металлургической промышленности как способ сбережения природных ресурсов и снижения экологической напряженности [Текст] / П.С. Романов, И.П. Романов. – М.: Синергия, 2016. – № 2. –С. 94–99.
18. Сатарин В.И., Шлакопортландцемент. Основной доклад. VI Международный конгресс по химии цемента [Текст]. – М.: б.и.–1974.– 32 с.
19. Сатарин В.И., Быстротвердеющий шлакопортландцемент [Текст] / В.И. Сатарин, Я.М. Сыркин, М.Б. Френкель / М.: Стройиздат. – 1970. – 152 с.
20. Сыркин Я.М., Химия и технология шлакопортландцемента [Текст] / Я.М. Сыркин, М.Б. Френкель / Киев: Госстройиздат УССР. – 1962. – 179 с.
21. Рояк С.М., Специальные цементы [Текст] / С.М. Рояк, Г.С. Рояк/ М.: Стройиздат. – 1983. – 279 с.
22. Дмитриев А.М., Теоретические и экономические основы технологии многокомпонентных цементов [Текст] / А.М. Дмитриев, В.В. Тимашев / Цемент. – 1981. №10. – С.1-4.
23. Сыркин Я.М. и др. Минеральный состав и свойства добавки эффективного интенсификатора твердения шлакопортландцемента [Текст] //Журнал прикладной химии. 1979.–Т.52, №11. – С. 1680-1687.
24. Майков В.П., О роли добавок в твердении шлакопортландцемента и шлаковых минералов [Текст] / В.П. Майков, Б.В. Гусев, В.Б. Ратинов/ Журнал прикладной химии. – 1976.Т.49, № 3. – С. 470-475.
25. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементных бетонов [Текст] / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 343 с.

## References

1. Mikhailov V.V. Expanding and straining cements and self-stressed reinforced concrete structures [Text] / V.V. Mikhaylov, S.L. Litver. – Publishing house: M.: Stroyizdat. – 1974. – 312p.
2. Kuznetsova T.V. Alumina cement [Text] / T.V. Kuznetsova, J. Talaber. – M.: Stroyizdat, 1988. – 272 p.
3. Tsilosani Z.N. Shrinkage and Creep of Concrete [Text]. Tbilisi: Metsniereba. – 1979.– 226 p.
4. Minenko E.Yu. Shrinkage and Shrinkage Cracking Resistance of High-Strength Concretes with Organomineral Modifiers [Text]: Ph. D. thesis / E.Yu. Minenko; MGRU. – Penza. 2004. – 130 p.
5. Ramachandran V.S. Additives in concrete. Reference Manual [Text] / V.S. Ramachandran, R.F. Feldman, M.I. Kolepari et al. – М.: Stroyizdat, 1988. – 575 p.
6. R. Physical and chemical properties of sulfated clinkers [Text] / Yu.R. Kriboborodov, S.V. Samchenko // Analytical review of VNIIESM. – М.: 1991. – Series 1. Cement Industry. – 55 p.

7. GOST 24544-81 Concretes. Methods for determination of shrinkage and creep (as amended by N 1) [Text]. – М.: Publishing house of standards. – 1987. – 18 p.
8. GOST 10180-2012 Concretes. Methods for determination of strength by reference samples [Text]. – М.: Standardinform. – 2021. – 31 p.
9. Dobrovolsky I.P. Recycling and utilization of industrial waste of the Chelyabinsk region [Text] / I.P. Dobrovolsky, I.Y. Chernyavky, A.N. Abyzov, Y.E. Kozlov. - Chelyabinsk: ed. "CJSC Chelyabinsk Interdistrict Printing House, 2003. – 256 p.
10. Panfilov M.I. Slag Recycling and Wasteless Technology in Metallurgy [Text] / M.I. Panfilov, Y.Shkolnik, N.V. Orininsky, V.A. Kolomiets, Y.V. Sorokin, A.A. Grabeklis – М.: Metallurgy, 1987. – 238 p.
11. Romanova I.P. The use of metallurgical industry waste in the construction industry as a way to save natural resources and reduce environmental stress [Text] / I.P. Romanova, O.B. Begunov / Territory of Science. – М., 2016. – № 2. – P. 94-99.
12. Usherov-Marshak A.V. Granulated blast furnace slag [Text] / Chemical and mineral additives in concrete. – Kharkiv: Colorit, 2005. – P. 84-96.
13. Chen, Y.L. The Composite Effect of Mineral Additives to the Performances of Concrete / Y.L. Chen, W.L. You // Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, 2007. – P. 289-301.
14. Kuznetsova T.V. Active mineral additives and their application [Text] / T.V. Kuznetsova, Z.B. Entin, B.S. Albets, L.Y. Goldstein, N.V. Sokolova, E.T. Yashina. – М.: Cement, 1981. – №10. – P. 6-8.
15. Swamy, R. N. Role and effectiveness of mineral admixtures in relation to alkali-silica reaction / R. N. Swamy // The alkali-silica reaction in concrete. Glasgow and London: Blackie and Son Ltd, 1992. – P. 144 - 170.
16. Dvorkin L.I. Construction materials from industrial wastes [Text] / L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin. – Moscow: Phoenix, 2007. – 368p.
17. Romanov P.S., Romanov I.P. Recycling wastes of metallurgical industry as a way to save natural resources and reduce environmental stress [Text] / P.S. Romanov, I.P. Romanov. -М.: Synergy, 2016. – № 2. – P. 94-99.
18. Satarin V.I., Slag-portland cement. Main report. VI International Congress on Chemistry of Cement [Text]. М. – 1974. – 32 p.
19. V.I. Satarin, Y.M. Syrkin, M.B. Frenkel / М: Stroyizdat. – 1970. – 152 p.
20. Syrkin Ya.M., Chemistry and Technology of Portland Slag Cement [Text] / Y.M. Syrkin, M.B. Frenkel / Kiev: Gosstroyizdat USSR. – 1962. – 179 p.
21. Royak S.M., Special cements [Text] / S.M. Royak, G.S. Royak / М.: Stroyizdat. – 1983. – 279 p.
22. Dmitriev A.M. Theoretical and economic basis of multicomponent cements technology / A.M. Dmitriev, V.V. Timashev / Cement. – 1981. №10. – P.1-4.
23. Syrkin Y.M. et al. Mineral composition and properties of effective hardening intensifier additive for Portland slag cement [Text] // Journal of Applied Chemistry. 1979. –V.52, №11. – P. 1680-1687.
24. Maykov V.P. On the role of additives in hardening of Portland slag cement and slag minerals [Text] / V.P. Maykov, B.V. Gusev, V.B. Ratinov/ Journal of applied chemistry. – 1976. V.49, № 3. – P. 470-475.
25. Sheikin A.E. Structure and Properties of Cement Concretes [Text] / A.E. Sheikin, Y.V. Chekhovsky, M.I. Brusser. – М.: Stroyizdat, 1979. – 343 p.

**Мясникова А.А.,**

к.т.н., доцент кафедры Архитектура, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия. E-mail: aakirsanova@susu.ru

**Myasnikova A.A.,**

Ph.D., as. professor of the Department of Architecture, South Urals State University, с. Chelyabinsk, Russia. E-mail: aakirsanova@susu.ru

*Поступила в редакцию 29.09.2022*