

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАКАОЛИНА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ УСАДКИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Д.О. Казанцев<sup>1</sup>, А.А. Курсанова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте,  
г. Златоуст, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Проведен анализ литературных источников по теме исследования. Выявлены основные причины возникновения усадочных деформаций цементного камня и бетона. Установлено, что усадка обусловлена прежде всего совместным действием капиллярных сил и сил, возникающих при удалении воды из слоев, образованных между кристаллами новообразований цементного камня. Рассмотрен эффективный метод снижения усадки цементного камня и бетона за счет введения добавок-модификаторов, включающих сульфат-ионы и алюминаты, позволяющие формировать различные модификации гидросульфатоалюмината кальция. Сформулирована основная гипотеза о влиянии метакеолина на усадочные деформации цементного камня и бетона, согласно которой совместное введение добавки с суперпластификатором и гипсом теоретически будет способствовать снижению усадочных деформаций.

*Ключевые слова:* органоминеральные добавки, активные минеральные добавки, метакеолин, усадка, цементный камень, бетон.

На сегодняшний день в современной строительной индустрии существует достаточно большое разнообразие бетона и изделий из него, которые имеют существенные различия, в том числе в условиях эксплуатации, что в значительной степени обуславливает необходимость применения специальных бетонов. К специальным бетонам относят материал, имеющий повышенные физико-механические характеристики, среди которых особое место занимают усадочные деформации.

Различают влажностную, карбонизационную и контракционную усадки бетона, наименее изученной из них остается влажностная, которая и вызывает основную деформацию цементного камня [1–6].

Усадка бетона вызвана прежде всего возникновением усадочных деформаций цементного камня и соответственно будет зависеть от вида применяемого цемента, его расхода и тонкости помола, а также водоцементного соотношения.

Исследованию процессов и явлений, объясняющих природу усадочных деформаций цементного камня и бетона, посвящены работы многих ученых: В.В. Михайлова, З.Н. Цилосани, В. Ромачандрана, Т. Пауэрса, Т.В. Кузнецовой, С.В. Александровского, Р. Майера, Ю.М. Баженова и многих других [1–9].

Так, например, З.Н. Цилосани утверждает, что капиллярная усадка цементного камня прямо пропорциональна его капиллярной пористости и среднему диаметру капилляров. Таким образом,

увеличение капиллярной пористости в структуре и повышение радиуса капилляров приводит к увеличению усадки цементного камня и бетона [6].

По мнению С.В. Александровского, А.Е. Шейкина, Л.М. Щербакова, капиллярная усадка связана с микроскопическими искривлениями поверхности жидкости на границе раздела фаз, а изменения молекулярного давления при этом не велики и носят второстепенный характер. Кроме того, А.Е. Шейкин утверждает, что максимальная усадка цементного камня проявляется только в условиях квазистатической сушки [7–9].

Многие исследователи объясняют влажностную усадку цементного камня и бетона прежде всего перераспределением и испарением влаги в структуре камня. Усадочные напряжения возникают в результате отсутствия гигроскопического равновесия цементного камня и воздуха, из-за малого коэффициента диффузии влаги высыхание происходит неравномерно и образуются градиенты влажности, которые приводят к появлению напряжений и деформаций. Поскольку структура бетона содержит капиллярную, адсорбционную и связанную воду, влажностная усадка включает в себя все три составляющих. Усадка начинается с испарения свободной воды, находящейся в поровом пространстве бетона. Далее происходит испарение и перераспределение адсорбционной и структурно-связанной воды [7–12].

Согласно современным представлениям, усадка обусловлена совместным действием капиллярных сил и сил, возникающих при удалении во-

ды из слоев, образованных между кристаллами новообразований цементного камня [7–12].

Многими исследователями было показано, что одним из эффективных методов снижения усадки цементного камня и бетона является создание направленной структуры и фазообразования за счет введения добавок-модификаторов, включающих сульфат-ионы и алюминаты, позволяющие формировать различные модификации гидросульфоалюмината кальция [12–16].

Хорошо известно применение активных минеральных добавок (АМД) для снижения усадки бетона. Так, например, использование золы-уноса или доменного гранулированного шлака уменьшает аутогенную усадку в раннем возрасте бетона, однако шлак следует вводить в дозировке более 20 %, поскольку меньшее количество может привести к снижению эффекта [12–18].

Многие исследования ориентированы на разработку комплексных добавок для снижения усадочных деформаций цементного камня и бетона, поскольку доказано, что многокомпонентные смеси более эффективны. Такие многокомпонентные системы обычно включают газообразующие вещества или добавки, синтезирующие соединения типа гидросульфоалюмината кальция (гипс, гипсо-известковые добавки), пластификаторы, замедлители или ускорители, стабилизаторы, пуццолановые добавки, например шлак или микрокремнезем [17–20].

Так, например известен органо-минеральный модификатор серии эмбэлит, включающий микрокремнезем и золу-уноса, расширяющую композицию (на основе гипса), который покрыт равномерно затвердевшей адсорбционной пленкой из самих молекул суперпластификатора [17].

Метакаолин также относится к АМД и представляет собой алюмосиликат, в связи с чем некоторые ученые утверждают, что его возможно применять для компенсации усадки бетона или получения расширяющихся составов, поскольку добавка будет способствовать формированию в цементном камне гидросульфоалюмината кальция (эттрингит). В работе Ю.М. Баженова представлены результаты по сравнению различных органо-минеральных добавок, в том числе и метакаолина, на усадку бетона. Согласно полученным данным метакаолин способствует некоторому снижению усадочных деформаций бетона [9].

Однако не установлены оптимальные дозировки метакаолина, при которых будет формироваться достаточное количество эттрингита, позволяющее снижать усадочные деформации. Кроме того, не рассмотрено влияние условий твердения модифицированного цементного камня на процесс формирования эттрингита и компенсацию возникающих напряжений.

На сегодняшний день экспериментальных подтверждений выше изложенной теории недоста-

точно, что обуславливает актуальность проведения дополнительных исследований.

В ранее проведенных исследованиях было доказано, что метакаолин является эффективной добавкой-ускорителем твердения бетона, однако его дозировку необходимо строго контролировать для предотвращения снижения стойкости бетона к агрессивному воздействию внешней среды. Кроме того, его необходимо вводить в комплексе с суперпластификатором для снижения воды затворения, поскольку метакаолин представляет собой мелкодисперсную добавку [20].

Введение метакаолина, особенно в больших дозировках может привести к созданию дефицита ионов кальция в жидкой фазе цементного камня.

В связи с выше изложенным очевидно, что для формирования необходимого количества эттрингита в структуре и компенсации усадочных деформаций цементного камня должно быть достаточное количество воды затворения и метакаолин необходимо вводить совместно с гипсом.

Таким образом, можно сделать вывод, что комплексное введение метакаолина совместно с суперпластификатором и гипсом теоретически будет способствовать снижению усадочных деформаций цементного камня и бетона.

### Литература

1. Михайлов, В.В. *Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции* / В.В. Михайлов, С.Л. Литвер. – М.: Стройиздат, 1974. – 312 с.
2. Кузнецова, Т.В. *Глиноземистый цемент* / Т.В. Кузнецова, Й. Талабер. – М.: Стройиздат, 1988. – 272 с.
3. *Добавки в бетон. Справочное пособие* / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М.И. Колепарди и др. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.
4. Кривобородов, Ю.Р. *Физико-химические свойства сульфатированных клинкеров* / Ю.Р. Кривобородов, С.В. Самченко // *Аналитический обзор ВНИИЭСМ*. – М., 1991. – Серия 1. *Цементная промышленность*. – 55 с.
5. Осокин, А.П. *Сульфожелезистые цементы и их свойства* / А.П. Осокин, Ю.Р. Кривобородов // *Труды Московского химико-технологического института им. Д.И. Менделеева. Выпуск 137: Силикатные материалы для строительства и техники*. – 1985. – С. 23–29.
6. Цилосани, З.Н. *Усадка и ползучесть бетона*. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – 226 с.
7. Александровский, С.В. *Экспериментально-теоретические исследования усадочных напряжений в бетоне* / С.В. Александровский // *Бетон и железобетон*. – М.: Стройиздат, 1965. – 285 с.
8. Janotka, I. *Metakaolin sand-blended-cement pastes: rheology, hydration process and mechanical properties* / I. Janotka, F. Puertas, M. Palacios et al. // *Construction and Buildings Materials*. – 2010. – Vol. 24. – P. 791–802.

9. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашиников. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.
10. Айрапетов, Г.А. О возможности направленного структурообразования напрягающих и расширяющихся бетонов / Г.А. Айрапетов, А.И. Панченко // Ресурсосберегающие технологии железобетонных конструкций на основе напрягающих цементов. – М.: Стройиздат, 1989. – С. 13–19.
11. Батудаева, А.В. Высокопрочные модифицированные бетоны из самовыравнивающихся смесей / А.В. Батудаева, Г.С. Кардумян, С.С. Каприелов // Бетон и железобетон. – 2005. – № 4. – С. 14–18.
12. Миненко, Е.Ю. Усадка и усадочная трещиностойкость высокопрочных бетонов с органоминеральными модификаторами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.23.05 / Е.Ю. Миненко; МГГРУ. – Пенза., 2004. – 130 с.
13. Оучи, М. Самоуплотняющийся бетон: разработка, применение и ключевые технологии / М. Оучи // Материалы 1-й Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона. – М., 2001. – Кн. 1. – С. 209–215.
14. Turcry, P. Study of Plastic Shrinkage of Self-compacting Concrete / P. Turcry, A. Loukoli // Proceedings of 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17–20 August 2003. Reykjavik, Iceland. – P. 576–585.
15. Фан, Т.В. Самоуплотняющиеся высокопрочные бетоны с золой рисовой шелухи и метакаолином: автореф. дис. ... канд. наук. 05.23.05 / Т.В. Фан; РГСУ. – Ростов н/Д., 2013. – 184 с.
16. Метакаолин в строительных растворах и бетонах / Л.И. Дворкин, Н.В. Лушникова, Р.Ф. Рунова и др. – Киев: Изд-во КНУБА, 2007. – 215 с.
17. Кардумян, Г.С. Новый органоминеральный модификатор серии «МБ» – Эмбэлит для производства высококачественных бетонов / Г.С. Кардумян, С.С. Каприелов // Строительные материалы, 2005. – № 8. – С. 12–15.
18. Винь, Н.Т. Разработка органоминеральных модификаторов для получения высокопрочных бетонов с компенсированной усадкой / Н.Т. Винь, Н.Д. Чинь, Ю.М. Баженов // Вестник МГСУ. – 2012. – № 1. – С. 72–76.
19. Effect of Superplasticizer Type on the Properties of High-Performance Concrete Incorporating Metakaolin / Byung-Gi Kim, Tae-Ho Ahn, Bum-Gu Kang, Yong-Tae Kim // Seventh CANMET/ACI Int. Conference. Berlin, Germany, 2003, Supplementary papers. – P. 82–97.
20. Кирсанова А.А. Высокофункциональные тяжелые бетоны, модифицированные комплексными добавками, включающими метакаолин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.23.05 / А.А. Кирсанова; ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ(НИУ)». – Челябинск, 2016. – 164 с.

**Казанцев Дмитрий Олегович**, студент группы ФТТ-208, кафедра «Промышленное и гражданское строительство», Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Златоусте (Златоуст), dmitriikazan4@gmail.com

**Кирсанова Алёна Андреевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы и изделия», Южно-Уральский государственный университет (Челябинск), aakirsanova@susu.ru.

Поступила в редакцию 27 января 2020 г.

DOI: 10.14529/build200207

## POSSIBILITIES OF USING METAKAOLIN TO REDUCE THE CEMENT STONE SHRINKAGE

**D.O. Kazantsev**<sup>1</sup>, dmitriikazan4@gmail.com

**A.A. Kirsanova**<sup>2</sup>, aakirsanova@susu.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Zlatoust, Russian Federation

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The analysis of literature on the topic of research was performed. The main causes of cement stone and concrete shrinkage were identified. It was found that the shrinkage is caused, first of all, by the combined action of capillary forces and forces appearing when water is removed from the layers formed between the crystals of the cement stone newgrowths. The effective method

for reducing the cement stone and concrete shrinkage was considered. The desired effect was achieved through the introduction of modifying additives, including sulfate ions and aluminates, which allow to form various modifications of calcium hydrosulfoaluminate. The main hypothesis was formulated about the effect of metakaolin on the shrinkage deformation of cement stone and concrete, according to which the addition of a combination of the additive with superplasticizer and gypsum would theoretically contribute to the reduction of the shrinkage deformations.

*Keywords: organomineral additives, active mineral additives, metakaolin, shrinkage, cement stone, concrete.*

### References

1. Mikhaylov V.V., Litver S.L. *Rasshiryayushchiysya i napryagayushchiy tsementy i samonapryazhennyye zhelezobetonnyye konstruktсии* [Expanding and Straining Cement and Self-Stressed Reinforced Concrete Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974. 312 p.
2. Kuznetsova T.V., Talaber Y. *Glinozemisty tsement* [Alumina Cement]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 272 p.
3. Ramachandran V.S., Fel'dman R.F., Kolepari M.I. *Dobavki v beton. Spravochnoye posobiye* [Additives in Concrete. Reference Manual]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988. 575 p.
4. Krivoborodov Yu.R., Samchenko S.V. *Fiziko-khimicheskiye svoystva sul'fatirovannykh klinkerov* [Physico-Chemical Properties of Sulfated Clinkers]. *Analiticheskiy obzor VNIIESM. Seriya 1. Tsementnaya promyshlennost'* [Analytical review of VNIIESM. Series 1. Cement Industry]. Moscow, 1991. 55 p.
5. Osokin A.P., Krivoborodov Yu.R. [Sulfo-Iron Cements and Their Properties]. *Trudy Moskovskogo khimiko-tekhnologicheskogo instituta im. D.I. Mendeleeva* [Proceedings of the Moscow Institute of Chemical Technology DI. Mendeleev]. Moscow, 1985, iss. 137, pp. 23–29. (in Russ.)
6. Tsilosani Z.N. *Usadka i polzuchest' betona* [Shrinkage and Creep of Concrete]. Tbilisi, Metsniyereba Publ., 1979. 226 p.
7. Aleksandrovskiy C.B. *Ekspperimental'no-teoreticheskiye issledovaniya usadochnykh napryazheniy v betone* [Experimental and theoretical Studies of Shrinkage Stresses in Concrete]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow, Stroyizdat, 1965. 285 p.
8. Janotka I., Puertas F., Palacios M. [Metakaolin sand-blended-cement pastes: rheology, hydration process and mechanical properties]. *Construction and Buildings Materials*, 2010, vol. 24, pp. 791–802.
9. Bazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. *Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony* [Modified High Quality Concrete]. Moscow, Izd-vo ASV Publ., 2006. 368 p.
10. Ayrapetov G.A., Panchenko A.I. [On the Possibility of Directional Structure Formation of Tensile and Expanding Concrete]. *Resursosberegayushchiye tekhnologii zhelezobetonnykh konstruktсий na osnove napryagayushchikh tsementov* [Resource-Saving Technologies for Reinforced Concrete Structures Based on Tensile Cements]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1989, pp. 13–19. (in Russ.)
11. Batudayeva A.B., Kardumyan G.S., Kapriylov S.S. [High-strength Concrete Modified from Self-Leveling Mixtures]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2005, no. 4, pp. 14–18. (in Russ.)
12. Minenko E.Yu. *Usadka i usadochnaya treshchinostoykost' vysokoprochnykh betonov s organomineral'nymi modifikatorami. Dis. kand. tekhn. nauk* [Shrinkage and Shrinkage Crack Resistance of High-Strength Concrete with Organomineral Modifiers. Cand. sci. diss.]. Penz., 2004. 130 p.
13. Ouchi M. [Self-Compacting Concrete: Development, Application and Key Technologies]. *Materialy I-y Vserossiyskoy konferentsii po problemam betona i zhelezobetona* [Proceedings of the 1st All-Russian Conference on Concrete and Reinforced Concrete]. Moscow, 2001, vol.1, pp. 209–215. (in Russ.)
14. Turcry P., Loukoli A. [Study of Plastic Shrinkage of Self-compacting Concrete]. [Proceedings of 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete]. Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 576–585.
15. Fan T.V. *Samouplotnyayushchiyesya vysokoprochnyye betony s zoloy risovoy shelukhi i metakaolinom. Dis. kand. tekhn. nauk* [Self-Compacting High-Strength Concrete with Rice Husk Ash and Metakaolin. Cand. sci. diss.]. Rostov-na-Donu, RGSU, 2013. 184 p.
16. Dvorkin L.I., Lushnikova N.V., Runova R.F. *Metakaolin v stroitel'nykh rastvorakh i betonakh* [Metakaolin in Mortars and Concrete]. Kiyev. Izdatel'stvo KNUBiA Publ., 2007. 215 p.
17. Kardumyan G.S., Kapriylov S.S. [The New Organomineral Modifier of the MB Series - Embalit for the Production of High-Quality Concrete]. *Stroitel'nyye materialy* [Construction Materials], 2005, no. 8, pp. 12–15. (in Russ.)
18. Vin' N.T., CHin' N.D., Bazhenov Yu.M. [Development of Organomineral Modifiers for Producing High-Strength Concrete with Compensated Shrinkage]. *Vestnik MGSU*, 2012, no. 1, pp. 72–76. (in Russ.)

19. Byung-Gi Kim, Tae-Ho Ahn, Bum-Gu Kang, Yong-Tae Kim [Effect of Superplasticizer Type on the Properties of High-Performance Concrete Incorporating Metakaolin]. [Seventh CANMET/ACI Int. Conference]. Berlin, Germany, 2003, Supplementary papers Publ., pp. 82–97.

20. Kirsanova A.A. *Vysokofunktsional'nyye tyazhelye betony, modifitsirovannyye kompleksnymi dobavkami, vklyuchayushchimi metakaolin. Dis. kand. tekhn. nauk* [Highly Functional Heavy Concrete Modified with Complex Additives Including Metakaolin. Cand. sci. diss.]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2016. 164 p.

*Received 27 January 2020*

---

**ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ**

Казанцев, Д.О. Перспективы применения метакАОлина для снижения усадки цементного камня / Д.О. Казанцев, А.А. Кирсанова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 49–53. DOI: 10.14529/build200207

**FOR CITATION**

Kazantsev D.O., Kirsanova A.A. Possibilities of Using Metakaolin to Reduce the Cement Stone Shrinkage. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2020, vol. 20, no. 2, pp. 49–53. (in Russ.). DOI: 10.14529/build200207

---