

doi: 10.5862/MCE.54.6

Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

*Аспирант А.Б. Стешенко;**д.т.н., заведующий кафедрой А.И. Кудяков,**Томский государственный архитектурно-строительный университет*

Аннотация. В работе представлены результаты исследования влияния модифицирующих добавок на усадочные деформации цементного пенобетона естественного твердения. Цементный пенобетон естественного твердения обладает повышенной усадкой пенобетонной смеси в форме (опалубке) и усадочной деформацией при высушивании. Существенный эффект снижения усадки достигается преимущественно путем управления микроструктурой композита, а именно изменения (ускорения) структурообразования и микроармирования цементного камня.

Для снижения усадки пенобетонной смеси и ускорения структурообразования пенобетонной смеси применялись глиоксаль кристаллический и хризотил-асбестовые волокна. Для приготовления пенобетонной смеси использовался одностадийный способ. Показатели пластической усадки и пластической прочности определяли в течение трех часов с момента заливки пенобетонной смеси в металлический сосуд.

Приведены результаты электронной микроскопии модифицированного пенобетона. В образцах с хризотил-асбестовыми волокнами и глиоксальной добавкой ячеистая структура однородна, поры равномерно заполняют все пространство. При введении в состав пенобетонной смеси хризотил-асбестовых волокон в количестве 2 % от массы цемента и глиоксаля кристаллического в количестве 0,01 % от массы цемента пластическая прочность пенобетонной смеси увеличивается на 63 и 45 % соответственно, пластическая усадка снижается до 29 и 40 %, а усадка при высыхании – до 44 и 50 % соответственно.

Ключевые слова: пенобетон; усадочные деформации; хризотил-асбест; глиоксаль кристаллический; прочность.

Введение

При изготовлении бетонных изделий после перемешивания компонентов и уплотнения смеси в результате физико-химического взаимодействия частиц цемента с водой в течение длительного времени (до нескольких месяцев и даже лет) наблюдаются объемные изменения бетона – расширение или усадка. В технологии бетонов этими явлениями стремятся управлять в зависимости от требуемых свойств конечной продукции путем введения добавок, изменяя режимы твердения и т. д. В большинстве случаев на практике процессы расширения и усадки бетона должны быть минимизированы. Особенно это актуально при необходимости обеспечения номинальных геометрических размеров изделий при их заводском изготовлении и конструкций при монолитном строительстве зданий. Существует множество теоретических моделей процессов, объясняющих объемные изменения цементного бетона при твердении. Однако механизм усадки цементных строительных композиций в первые часы естественного твердения пока еще не раскрыт [1–6].

Проблема получения безусадочных ячеистых бетонов естественного твердения до сих пор не решена. Цементный пенобетон естественного твердения обладает повышенной усадкой пенобетонной смеси в форме (опалубке) и усадочной деформацией при высушивании. Согласно ГОСТ 25485-89 усадка при высыхании пенобетонов естественного твердения не должна превышать 3 мм/м. По результатам систематических многолетних натурных обследований конструкций эксплуатируемых зданий ширина раскрытия трещин пенобетонов может достигать 3–5 мм/м [7]. При таких значениях усадки образуются трещины в изделиях и конструкциях стен и создаются аварийные ситуации.

Технология изготовления пенобетона постоянно совершенствуется, вносятся предложения по использованию новых и эффективных добавок, модернизации технологических процессов, что позволяет повысить уровень и стабильность качества стенового материала [8–12]. В настоящее время решением проблемы повышения качества поризованных бетонов занимается много научных коллективов [9, 11, 13–15]. Основная идея этих исследований заключается в поисках эффективных добавок (пластифицирующих, микроармирующих и ускоряющих начальное структурообразование) и способов их селективного введения для модификации пенобетонной Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

смеси с целью уменьшения усадочных деформаций и повышения прочности, водостойкости, паропроницаемости пенобетона, а также для повышения теплозащиты и трещиностойкости ограждающих пенобетонных конструкций.

Одной из новых модифицирующих добавок, рекомендуемых в строительном материаловедении для регулирования структурообразования цементных строительных смесей, является кристаллический глиоксаль. Глиоксаль кристаллический обладает высокой химической активностью по отношению к портландцементу. При дозировках глиоксаля более 0.5 % от массы цемента процесс структурообразования цементного теста начинается практически мгновенно, при этом сроки схватывания существенно сокращаются. Ранее проведенными исследованиями была показана целесообразность использования глиоксаля кристаллического при изготовлении цементного пенобетона естественного твердения в количестве 0.01 % от массы цемента. В данной работе исследуется возможность использования глиоксаля кристаллического при изготовлении цементного пенобетона для снижения его усадочных деформаций.

Эффективными инструментами уменьшения усадочных деформаций цементного пенобетона являются введение в пенобетонную смесь микроармирующих добавок и совершенствование технологических процессов их равномерного распределения по объему [9, 16, 17]. В качестве армирующих добавок в производстве строительных материалов используются различные органические и неорганические волокна (фибры). Однако, учитывая толщину стенок пор пенобетона, достичь эффективного армирования можно, только используя микротрубчатые материалы, размеры которых меньше диаметра стенки пор. Таким требованиям соответствуют природный материал хризотил-асбест, который может быть использован в качестве микродисперсной арматуры [15].

Из результатов ранее выполненных исследований строительных смесей с модифицирующими добавками [18–21] известно, что существенный эффект снижения усадки достигается преимущественно путем управления микроструктурой композита, а именно изменением (ускорением) структурообразования и микроармирования цементного камня. В качестве основных критериев оценки положительного эффекта хризотил-асбестовых волокон и глиоксаля кристаллического в пенобетонных смесях были выбраны: пластическая прочность пенобетонной смеси, пластическая усадка пенобетонной смеси и усадка при высыхании пенобетона.

Цель работы – установление закономерностей влияния хризотил-асбестового волокна и глиоксаля кристаллического на усадочные деформации цементного пенобетона естественного твердения. Объектами исследований являлись пенобетонная смесь и затвердевший пенобетон естественного твердения с добавками. Предмет исследований – технологические процессы получения и свойства пенобетона, модифицированного добавками.

Материалы и методы

При проведении исследований использовались следующие материалы:

- портландцемент Топкинского завода ЦЕМ I 42.5Н с нормальной плотностью 27 %, началом и концом схватывания 2 часа 30 мин. и 3 часа 10 мин. соответственно (ГОСТ 30515-2013);
- песок кварцевый Кудровского месторождения Томской области с модулем крупности 1.86, истинная и насыпная плотность 2580 и 1540 кг/м³, содержание пылеватых и глинистых примесей 1.4 % (ГОСТ 8736-93);
- синтетический пенообразователь ПБ-Люкс, представляющий собой жидкий раствор поверхностно-активных веществ со стабилизирующими добавками, устойчивость пены не менее 360 с, кратность пены рабочего раствора с объемной долей пенообразователя 4 % не менее 7 (ТУ 2481-004-59586231-2005);
- вода водопроводная (ГОСТ 23732-79);
- хризотил-асбестовое волокно марки А-6К-30 Баженовского месторождения, химический состав асбестовых волокон приведен в [18];
- глиоксаль кристаллический, крупнозернистый порошок, растворимый в воде.

Содержание глиоксаля кристаллического в добавке – 84.4 %, сорт А. Глиоксаль кристаллический изготовлен ООО «Новохим» (Россия, г. Томск) и соответствует требованиям ТУ 2633-004-67017122-2011.

Для исследования влияния добавок на параметры усадки пенобетона был использован ранее разработанный базовый состав пенобетона с маркой по средней плотности D500. По критерию достижения максимальной прочности пенобетона было установлено оптимальное содержание добавок в пенобетонной смеси. Составы пенобетонов с кристаллическим глиоксалем и хризотил-асбестовым волокном, используемые при проведении исследований, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Состав пенобетона D 500 с добавками на 1 м³

Вид добавок	Цемент, кг	Песок, кг	Вода, л	Пенообразователь, л	Добавка, кг
Глиоксаль кристаллический	266	133	200	1,6	0,026
Хризотил-асбестовые волокна	265	133	199	1,6	5,3

Приготовление пенобетонной смеси проводилось одностадийным способом на лабораторном пенобетоносмесителе. В смеситель заливалась отдозированная вода, затем загружалась добавка (хризотил-асбестовые волокна или глиоксаль кристаллический) в необходимом количестве. Перемешивание добавки с водой осуществлялось в течение 1 мин. Далее в смеситель загружали песок и цемент, смесь перемешивалась в течение 2 мин. до получения однородной пластичной массы. После этого в полученную смесь вводился водный раствор пенообразователя, и все компоненты дополнительно перемешивались еще 4,5 мин.

Для определения усадочных деформаций пенобетона при высыхании готовились образцы 40x40x160 мм путем заливки готовой пенобетонной смеси в металлические формы. Отформованные образцы пенобетона до проведения испытаний выдерживались в стандартных влажных условиях в камере естественного твердения в течение 28 суток. Испытание и оценка качества пенобетона проводились по ГОСТ 25485–89.

Для определения пластической прочности приготовленную пенобетонную смесь укладывали в металлический сосуд высотой 200 мм и диаметром 200 мм. Согласно данной методике [22] сосуд наполняется смесью на высоту 170 мм и встряхивается 5–7 раз для выравнивания поверхности уложенной смеси. Сосуд со смесью устанавливают на площадку штатива, в котором с помощью стопорного винта закреплен конус с углом при вершине 30° и высотой 25 мм. Масса конуса с закрепленным на нем скользящим стержнем равна 0,3 кг. Штатив имеет шкалу с ценой деления 1 мм. Острие конуса подводят к поверхности пенобетонной смеси, по шкале штатива фиксируют начальный отсчет (h_n). Затем отпускают стопорный винт и после погружения конуса в смесь под действием собственной массы фиксируют положение острия конуса (h_k). Глубина погружения конуса (H_i) определяется разницей показаний $H_i = h_k - h_n$. За величину глубины погружения принимается среднее арифметическое трех испытаний, полученных в результате погружения конуса при последовательном повороте сосуда на 120° вокруг своей оси. Измерение пластической усадки продолжалось в течение 3 часов, т. е. времени, которое необходимо для перехода из пластичного в структурированное состояние (формирование начальной структуры пенобетона).

Пластическая прочность рассчитывалась по формуле:

$$T_i = K \cdot P / H_i^2,$$

где P – масса конуса со скользящим стержнем, кг;

K – коэффициент, зависящий от угла конуса. При угле, равном 30°, $K = 0,4446$.

Для определения пластической усадки пенобетонной смеси готовую смесь укладывали в металлический сосуд, имеющий внутри форму конуса для достоверного измерения усадки, и форму цилиндра снаружи для надежного расположения сосуда на столе. Применение сосуда подобной конструкции позволяет получить более достоверную величину пластической усадки в сравнении с сосудом цилиндрической формы [23]. Отличия усадки при использовании конусных и цилиндрических сосудов изображены на рисунке 1. Согласно данной методике измерения пластической усадки пенобетонной смеси сосуд со смесью устанавливается на площадку штатива, в котором с помощью стопорного винта закреплен индикатор часового типа. Поверхность пенобетонной смеси накрывается полиэтиленовой пленкой для устранения испарения влаги, поверх которой располагается металлическая пластинка, в соприкосновении с которой начинается отсчет по индикатору. Измерение пластической усадки продолжалось также в течение 3 часов.

Стещенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

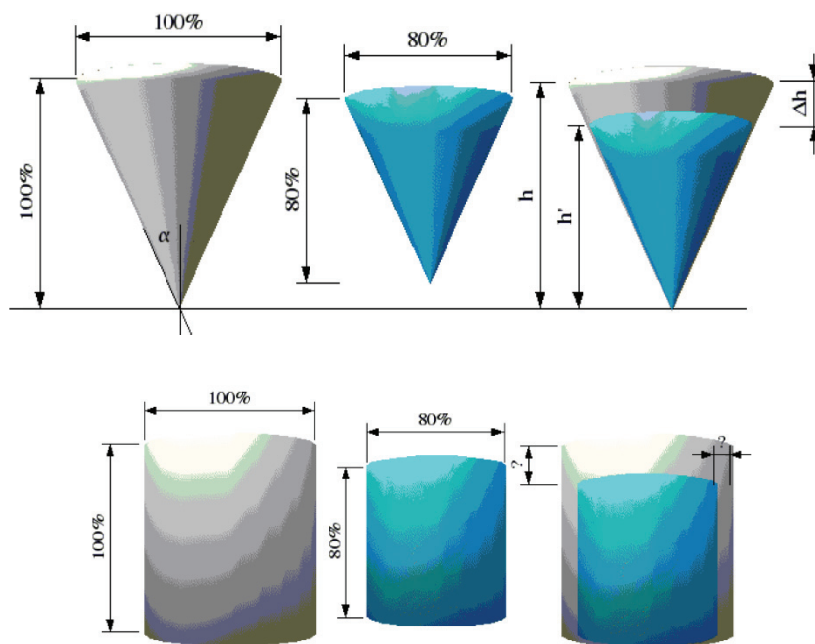


Рисунок 1. Исследование микроструктуры образцов пенобетона, выполнено на растровом электронном микроскопе Quanta 200 3D

Результаты и обсуждение

Как показывают результаты, приведенные на рисунке 2, пенобетонные смеси с добавками в начальные сроки твердения имеют более высокие показатели пластической прочности, чем смеси без добавок. После 3 часов твердения пластическая прочность пенобетонных смесей с глиоксалем кристаллическим и хризотил-асбестовыми волокнами по сравнению с контрольным составом больше на 45 и 63 % соответственно. Таким образом, введение в пенобетонную смесь глиоксаля и хризотил-асбестовых волокон позволяет ускорить процесс начального структурообразования пенобетона, осуществить быструю распалубку готового изделия [12].

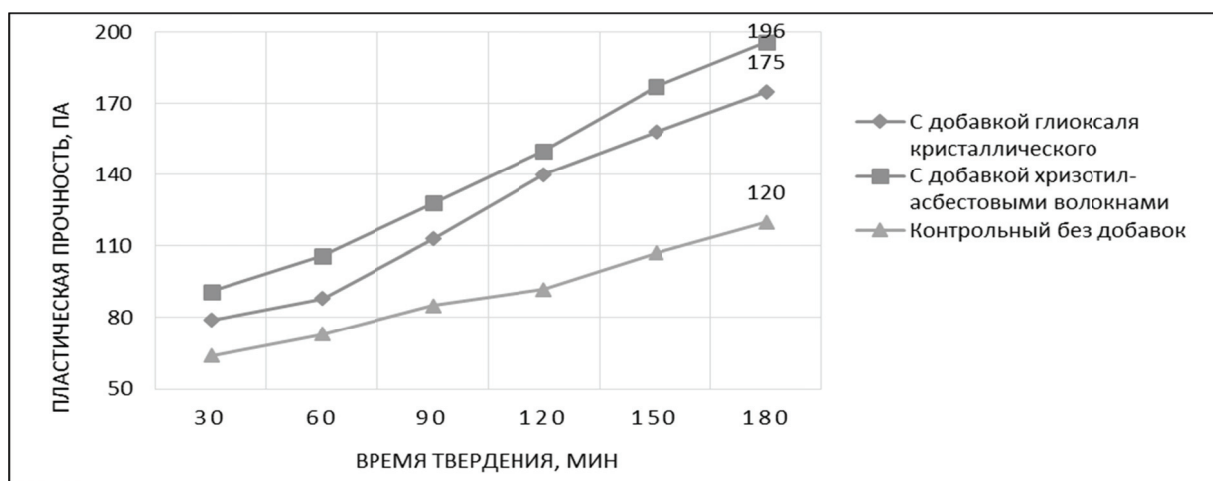


Рисунок 2. Пластическая прочность пенобетонных смесей

Установлено, что при введении в пенобетонную смесь глиоксаля кристаллического и хризотил-асбестовых волокон усадка пластическая уменьшается на 29 и 40 % соответственно (рис. 3), а усадка при высыхании пенобетона естественного твердения уменьшается на 44 и 50 % (рис. 4).

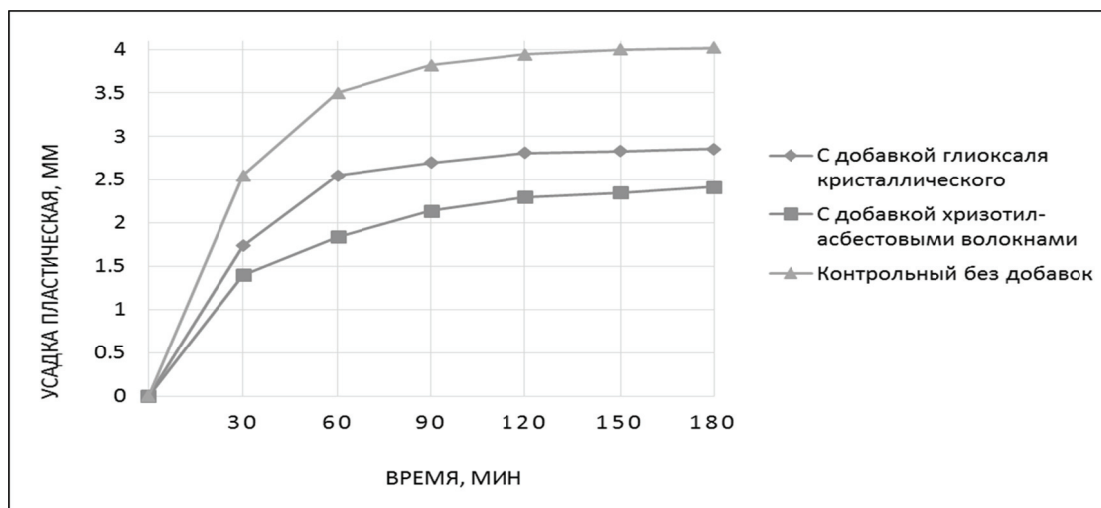


Рисунок 3. Пластическая усадка пенобетонных смесей

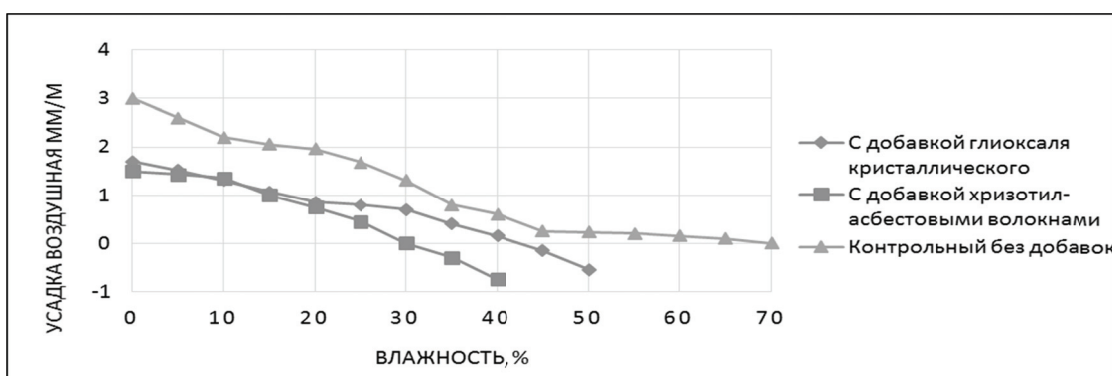


Рисунок 4. Кривые усадки при высыхании образцов цементного пенобетона

Для объяснения причин снижения усадочных деформаций пенобетонов с добавками были проведены исследования микроструктуры образцов (рис. 5). Анализ микроснимков сколов пенобетона показывает, что снижение усадочных деформаций пенобетона при введении хризотил-асбестовых волокон и глиоксаля кристаллического в количестве 2 и 0,01 % от массы цемента соответственно объясняется более однородной структурой. В контрольных образцах наблюдаются перфорация и интенсивные разрушения стенок пор, а также их объединение (рис. 5, а), что способствует развитию процесса седиментации, снижению однородности микроструктуры. В образцах с хризотил-асбестовыми волокнами (рис. 5, б) и глиокселевой добавкой (рис. 5, в) ячеистая структура однородна, поры равномерно заполняют все пространство.

Результаты исследования микроструктуры образцов пенобетона показали, что присутствие хризотил-асбестовых волокон и глиоксаля кристаллического в пенобетоне стабилизирует его структуру (рис. 5, б, в) и обеспечивает отсутствие протекания жидкости в стенках пор, которое происходит в контрольных образцах пенобетона без добавок (рис. 5, а).

Распределенные хризотил-асбестовые волокна в цементном пенобетоне играют роль центров кристаллизации. Это, с одной стороны, приводит к развитию фибриллярной структуры на стенках пор, что, в свою очередь, обеспечивает ее непрерывность и равномерность (рис. 5, б), а с другой стороны, обеспечивает упорядоченную структуру, ориентированную над молекулярной оболочкой волокна. Это приводит к снижению усадки пенобетона [15].

При введении модифицирующей глиокселевой добавки повышается воздухоовлечение и образуются замкнутые поры меньших размеров (рис. 5, в).

Существенное снижение усадочных деформаций при естественном твердении пенобетона позволяет прогнозировать пониженный уровень формирования напряжений при структурообразовании в объеме пенобетона и, как следствие, повышенную эксплуатационную надежность изделий (конструкций), изготовленных из этого материала [22, 24].

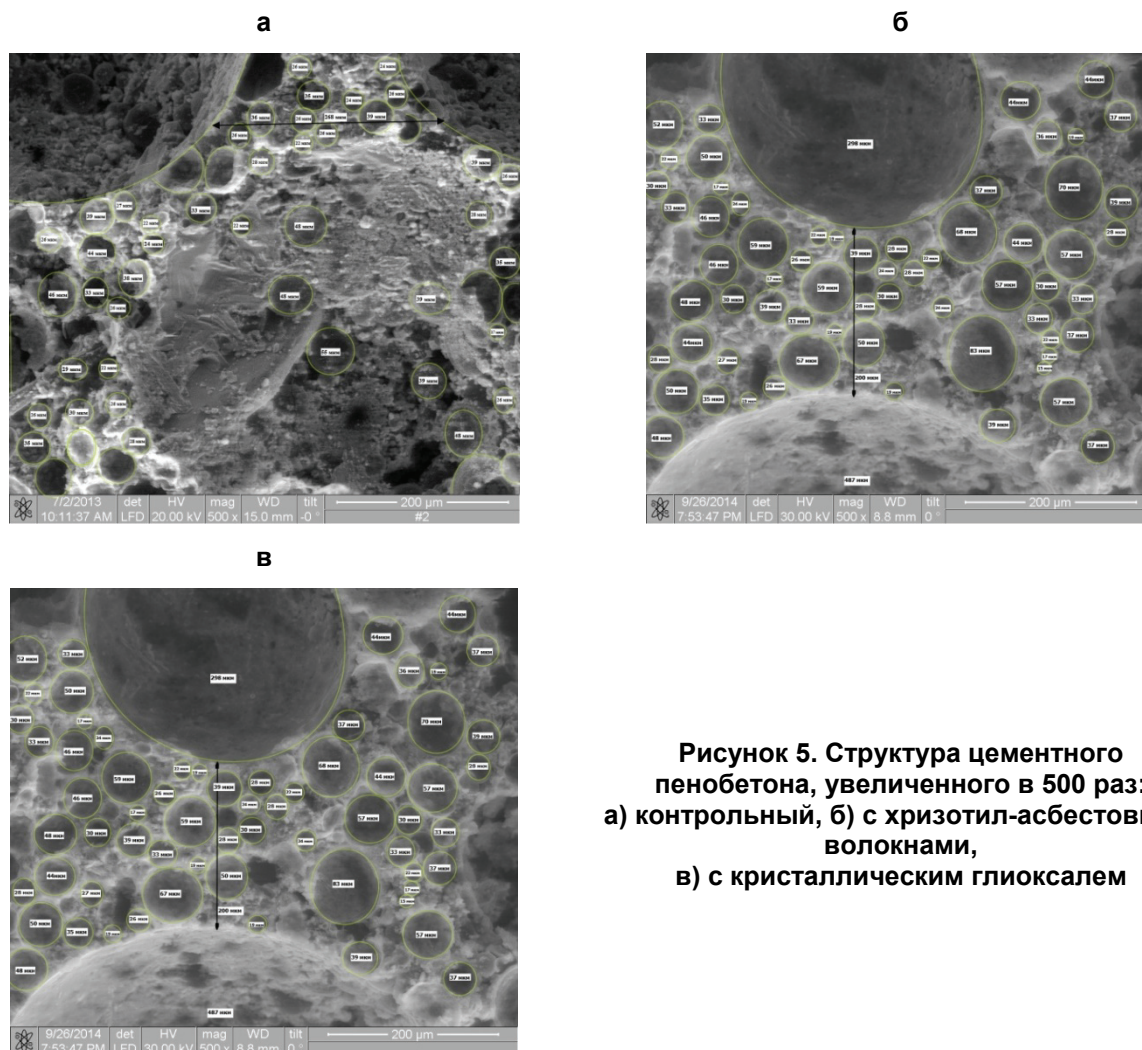


Рисунок 5. Структура цементного пенобетона, увеличенного в 500 раз: а) контрольный, б) с хризотил-асбестовыми волокнами, в) с кристаллическим глиоксалем

Выводы

1. Для ускорения процесса начального структурообразования цементного пенобетона естественного твердения и снижения усадочных деформаций необходимо при приготовлении пенобетонной смеси вводить микроармирующие добавки (хризотил-асбестовые волокна) и модифицирующие добавки (глиоксаль кристаллический) в соответствии с установленным регламентом.

2. При введении в состав пенобетонной смеси хризотил-асбестовых волокон в количестве 2 % от массы цемента и глиоксаля кристаллического в количестве 0,01 % от массы цемента увеличивается пластическая прочность пенобетонной смеси на 63 и 45 %, снижается пластическая усадка до 29 и 40 % и усадка при высыхании до 44 и 50 % соответственно.

3. Структура пенобетона с хризотил-асбестовым волокном и глиоксалем кристаллическим мелкопористая, увеличивается количество замкнутых пор, равномерно распределенных по объему.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках гранта № 119-12/НИОКТР от 03.11.2012 «Разработка и запуск в производство технологии строительства энергоресурсосберегающего жилья экономического класса на основе универсальной полносборной каркасной конструктивной системы».

Литература

1. Markus G. Measuring the Early Shrinkage of Mortars Drymix Mortar Yearbook 2011 Editor: Ferdinand Leopolder, 2011. Pp. 1–11.

Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

2. Bentur A., Igarashi S., Kovler K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates // Cement and Concrete Research. 2001. No. 11. Pp. 1587–1591.
3. Shah H.R., Weiss J. Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test // Materials and Structures. 2006. Vol. 39. No. 9. Pp. 887–899.
4. Bouasker M., Mounanga P., Turcry P., Loukili A., Khelidj A. Chemical Shrinkage of Cement Pastes and Mortars at Very Early Age: Effect of Limestone Filler and Granular Inclusions // Cement and Concrete Composites. 2008. Vol. 30. Issue 1. Pp. 13–22.
5. Henkensiefken R., Briatka P., Bentz D., Nantung T., J. Weiss. Plastic Shrinkage Cracking in Internally Cured Mixtures Made with Pre-wetted Lightweight Aggregate // Concrete International. 2010. Vol. 32. Issue 2. Pp. 49–54.
6. Saliba J., Rozière E., Grondin F., Loukili A. Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Plastic and Long-Term Shrinkage // Cement and Concrete Composites. 2011. Vol. 33. Issue 2. Pp. 209–217.
7. Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистого бетона. М.: Стройиздат, 1986. 176 с.
8. Пименова Л.Н., Кудяков А.И. Пенобетон, модифицированный силикагелем // Вестник ТГАСУ. 2013. №2. С. 229–233.
9. Василовская Н.Г., Енджиевская И.Г., Калугин И.Г. Управление структурой ячеистых фибробетонов // Известия вузов. Строительство. 2010. No. 11–12. Pp. 12–13.
10. Girnienė I., Laukaitis A. The effect of the hardening conditions on foam cement concrete strength and phase composition of new formations // Materials Science. 2002. No.1. Pp. 77–82.
11. Kahmer H. Fibrous concrete successfully used in structural precast component production // Concrete Plant + Precast Technology. 2001. No. 8. Pp. 26–31.
12. Kudyakov A. [et al] Foam concrete with porous mineral and organic additives // IOP Conf. Series: Materials Science Engineering. 2015. Vol. 71. №012016.
13. Рахимбаев Ш.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н., Анканова Т.В. К вопросу снижения усадочных деформаций изделий из пенобетона // Известия вузов. Строительство. 2007. №12. С. 41–44.
14. Zuhua Z., John L. Provis, Andrew R., Hao W. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127.
15. Kudyakov A. I., Steshenko A. B. Shrinkage deformation of cement foam concrete // IOP Conf. Series: Materials Science Engineering. 2015. Vol. 71. №012019.
16. Кудяков А.И., Киселев Д.А. Проектирование неавтоклавногo пенобетона // Строительные материалы. 2006. №11. С. 8–9.
17. Комохов П. Г. Современные пенобетоны. М.: Наука, 1997. 284 с.
18. Кудяков А.И., Стешенко А.Б. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения // Вестник ТГАСУ. 2014. №2. С. 128.
19. Tagnit-Hamou A., Vanhove Y., Petrov N. Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes // Cement Concrete Research. 2005. Vol. 32. No. 2. Pp. 364–370.
20. Yakovlev G., Keriene J., Gailius A., Girnienė I. Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes // Materials Science. 2006. Vol. 12. No. 2. Pp. 147–151.
21. Lura P., Durand F., Jensen O., Kovler K. Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers // International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation. RILEM Publications SARL. 2006. Pp. 97–106.
22. Моргун Л.В., Моргун В.Н. Влияние дисперсного армирования на агрегативную устойчивость пенобетонных смесей // Строительные материалы. 2003. №1. С. 33–35.
23. Jensen O.M., Christensen S.L., Dela B.F., Hansen J.H., Hansen P.F., Nielsen A., HETEK – control of early age cracking in concrete – Phase 2: Shrinkage of mortar and concrete. Report № 110. Road Directorate. Denmark Ministry of Transport. 1997.
24. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Cement Foam Concrete with Low Shrinkage // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 1085. Pp. 245–249.

*Алексей Борисович Стешенко, г. Томск, Россия
Тел. моб.: +7(909)5396643; эл. почта: steshenko.alexey@gmail.com*

*Александр Иванович Кудяков, г. Томск, Россия
Тел. моб.: +7(913)8208554; эл. почта: kudyakow@mail.tomsknet.ru*

© Стешенко А.Б., Кудяков А.И., 2015

Стешенко А.Б., Кудяков А.И. Раннее структурообразование пенобетонной смеси с модифицирующей добавкой

doi: 10.5862/MCE.54.6

Early structure formation of foam concrete mix containing modifying admixture

A.B. Steshenko*Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia
+79095396643; e-mail: steshenko.alexey@gmail.com***A.I. Kudyakov***Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia
+79138208554; e-mail: kudyakov@mail.tomsknet.ru*

Key words

foam concrete; shrinkage strain; chrysotile asbestos; crystalline glyoxal; strength

Abstract

Cement based foam concrete of natural aging experiences high shrinkage of foam concrete mix in the formwork and shrinkage strain when drying. When managing the microstructure of the composite, namely the change (acceleration) of the microstructure formation and reinforcement of the cement stone, significant decrease can be achieved in the values of shrinkage strain.

The purpose of this research is to study the patterns of influence of the chrysotile asbestos fibers and the glyoxal crystalline on shrinkage deformations of cement based foam concrete of natural aging. The foam concrete mixture was produced by one-step technology in the laboratory mixer. Values of plastic shrinkage and plastic strength were determined during three hours after pouring the foam concrete mixture into a metal vessel.

The microstructure investigation results have shown that introduction of chrysotile asbestos fibers in an amount of 2 % and glyoxal crystalline in an amount of 0.01 % by weight of cement provides a finely porous foam concrete structure with more uniform size closed pores, which are evenly distributed over the volume. Experimental studies have demonstrated that if chrysotile asbestos fibers are introduced in an amount of 2% and the crystalline glyoxal in an amount of 0.01 % by weight of cement it leads to decrease in plastic shrinkage by 40 to 29%, shrinkage when drying by 44 and 50% and growth in plastic strength by 63 and 45% respectively.

References

1. Markus G. Measuring the Early Shrinkage of Mortars. Drymix Mortar Yearbook 2011 Editor: Ferdinand Leopolder, 2011. Pp. 1–11.
2. Bentur A., Igarashi S., Kovler K. Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates. *Cement and Concrete Research*. 2001. No. 11. Pp. 1587–1591.
3. Shah H.R., Weiss J. Quantifying shrinkage cracking in fiber reinforced concrete using the ring test. *Materials and Structures*. 2006. No. 9. Pp. 887–899.
4. Bouasker M., Mounanga P., Turcry P., Loukili A., Khelidj A. Chemical Shrinkage of Cement Pastes and Mortars at Very Early Age: Effect of Limestone Filler and Granular Inclusions. *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30. Issue 1. Pp. 13–22.
5. Henkensiefken R., Briatka P., Bentz D., Nantung T., J. Weiss. Plastic Shrinkage Cracking in Internally Cured Mixtures Made with Pre-wetted Lightweight Aggregate. *Concrete International*. 2009. Vol. 32. Issue 2. Pp. 49–54.
6. Saliba J., Rozière E., Grondin F., Loukili A. Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Plastic and Long-Term Shrinkage. *Cement and Concrete Composites*. 2011. Vol. 33. Issue 2. Pp. 209–217.
7. Silayenkov Ye.S. *Dolgovechnost izdeliy iz yacheistogo betona* [Durability of products from cellular concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1986. 176 p. (rus)
8. Pimenova L.N., Kudyakov A.I. Penobeton, modifitsirovanny silikagelem [Foam concrete modified with silica gel]. *VESTNIK of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 229–233. (rus)
9. Vasilovskaya N. G., Yendzhiyevskaya I. G., Kalugin I. G. Upravleniye struktur yacheistyx fibrobetonov [Management structure of cellular fiberconcrete]. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2010. No.11–12. Pp.12–13. (rus)

10. Girnienė I., Laukaitis A. The effect of the hardening conditions on foam cement concrete strength and phase composition of new formations. *Materials Science*. 2002. No. 1. Pp. 77–82.
11. Kahmer H. Fibrous concrete successfully used in structural precast component production. *Concrete Plant + Precast Technology*. 2001. No. 8. Pp. 26–31.
12. Kudyakov A. [et al.]. Foam concrete with porous mineral and organic additives. *IOP Conf. Series: Materials Science Engineering*. 2015. Vol. 71. №012016.
13. Rakhimbayev Sh.M., Degtev I.A., Tarasenko V.N., Anikanova T.V. K voprosu snizheniya usadochnykh deformatsiy izdeliy iz penobetona [On the question of reducing the shrinkage deformation of foam concrete products]. *News of higher educational institutions. Construction*. 2007. No 12, Pp. 41–44. (rus)
14. Zuhua Z., John L. Provisb, Andrew R., Hao W. Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 56. Pp. 113–127.
15. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Shrinkage deformation of cement foam concrete. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. 2015. Vol. 71. No. 012019.
16. Kudyakov A.I., Kiselev D.A. Proyektirovaniye neavtoklavnogo penobetona [Design of non-autoclaved aerated concrete]. *Building materials*. 2006. No. 11. Pp. 8 – 9. (rus)
17. Komokhov P. G. *Sovremennyye penobetonny* [Modern foam concretes]. Moscow: Nauka, 1997. 284 p. (rus)
18. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Penobeton dispersno-armirovanny teploizolyatsionnyy yestestvennogo tverdeniya [Heat insulating reinforced air hardened foamed concrete]. *VESTNIK of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2. P.128. (rus)
19. Tagnit-Hamou A., Vanhove Y., Petrov N. Microstructural analysis of the bond mechanism between polyolefin fibers and cement pastes. *Cement Concrete research*. 2005. No. 2. Pp. 364–370.
20. Yakovlev G., Keriene J., Gailius A., Girniene I. Cement Based Foam Concrete Reinforced by Carbon Nanotubes. *Materials science*. 2006. Vol. 12. No. 2. Pp. 147–151.
21. Lura P., Durand F., Jensen O., Kovler K. Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*. RILEM Publications SARL. 2006. Pp. 97–106.
22. Morgun L.V., Morgun V.N. Vliyaniye dispersnogo armirovaniya na agregativnyuyu ustoychivost penobetonnykh smesey [The impact of disperse reinforcement on aggregate stability of foam concrete mixtures]. *Building materials*. 2003. No.1. Pp. 33-35. (rus)
23. Jensen O.M., Christensen S.L., Dela B.F., Hansen J.H., Hansen P.F., Nielsen A., *HETEK – control of early age cracking in concrete – Phase 2: Shrinkage of mortar and concrete*. Report No. 110. Road Directorate. Denmark Ministry of Transport. 1997.
24. Kudyakov A. I., Steshenko A. B. Cement Foam Concrete with Low Shrinkage. *Advanced Materials Research*. 2015 Vol. 1085 Pp. 245–249.

Full text of this article in Russian: pp. 56–62