

С.Н. ЛЕОНОВИЧ¹, д-р техн. наук (SLeonovich@mail.ru); Д.В. СВИРИДОВ², д-р хим. наук (info@bsu.by); Г.Л. ЩУКИН², канд. хим. наук; П.И. РАДЮКЕВИЧ³, директор (zaoparad@bk.ru); А.Л. БЕЛАНОВИЧ², канд. хим. наук, В.П. САВЕНКО², ст. научн. сотрудник, С.А. КАРПУШЕНКОВ², канд. хим. наук

¹ Белорусский национальный технический университет (220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, 65)

² Белорусский государственный университет (220030, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Ленинградская, 14)
ЗАО «Парад» (220014, Республика Беларусь, г. Минск, ул. Минина, 14)

Состав сухой смеси для неавтоклавного пенобетона естественного твердения

Разработан состав сухой смеси для изготовления неавтоклавного пенобетона естественного твердения на основе портландцемента, пенообразователя Ufapore, ускоряющей и пластифицирующей добавки Цитрат-Т, микрокремнезема МК-85, сульфатоалюминатной добавки РСАМ, базальтового волокна и полимерного порошка Vinappas-8034, при затворении которой водой при В/Т 0,4–0,6, последующим механическом вспучивании (2000 об/мин) и отверждении пеномассы формируется неавтоклавный пенобетон плотностью 400–800 кг/м³ (в зависимости от В/Т), прочностью 1,1–3,4 МПа, с низким водопоглощением (50–60%) и не содержащий усадочных трещин. По механическим свойствам близок к автоклавному газобетону.

Ключевые слова: сухая смесь, неавтоклавный пенобетон, добавки, усадочные трещины, долговечность.

S.N. LEONOVICH¹, Doctor of Sciences (Engineering) (SLeonovich@mail.ru); D.V. SVIRIDOV², Doctor of Sciences (Chemistry) (info@bsu.by); G.L. SHCHUKIN², Candidate of Sciences (Chemistry), P.I. RADYUKEVICH³, Director (zaoparad@bk.ru); A.L. BELANOVICH², Candidate of Sciences (Chemistry), V.P. SAVENKO², Senior staff scientist, S.A. KARPUSHENKOV², Candidate of Sciences (Chemistry)

¹ Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Avenue, Minsk, 220013, Belarus)

² Belarusian State University (14, Leningradskaya Street, Minsk, 220030, Belarus)

³ «Parad» ZAO (14, Minina Street, Minsk, 220014, Belarus)

Composition of a Dry Mix for Non-Autoclaved Foam Concrete of Natural Hardening

A dry mix composition for manufacturing the non-autoclaved foam concrete of natural hardening on the basis of Portland cement, foaming agent Ufapore, quickening and plasticizing agent Tsitrat-T, microsilica МК-85, sulfate-aluminate additive РСАМ, basalt fiber, and polymeric powder Vinappas-8034 has been developed. In the course of mixing the dry mix with water at В/Т 0,4–0,6, subsequent mechanical swelling (2000 rpm), and foam mass hardening, the non-autoclaved concrete of 400–800 kg/m³ density (depending on В/Т), 1,1–3,4 МПа strength, low water absorption (50–60%) and without shrinkage cracks is formed. Its mechanical properties are very close to autoclaved concrete properties.

Keywords: dry mix, non-autoclaved foam concrete, additives, shrinkage cracks, durability.

Среди теплоизоляционных строительных материалов ячеистые бетоны – пенобетон и газобетон (автоклавный) по комплексу технических, экономических, экологических показателей и долговечности превосходят другие.

Неавтоклавный пенобетон является многофункциональным строительным материалом, изготавливаемым из недорогого и доступного сырья, представляет собой обычный цементный раствор, в состав которого входят пенообразующие и минеральные добавки. Они используются для наполнения бетонной массы воздушными пузырьками. Причем распределяются пузырьки равномерно по всему объему материала, тем самым делая бетон более легким, с хорошими тепло- и звукоизоляционными характеристиками. Изготовление пенобетона не сложно: достаточно иметь специальный пеногенератор и смеситель, в котором происходит смешивание цемента с пеной. Что касается газобетона, то в состав материала входит кварцевый песок, цемент, известь, алюминиевая пудра и вода. Механизм поризации и твердения отличается от пенобетона: раствор поднимается и увеличивается в объеме из-за выделения водорода; твердение газобетона осуществляется в определенных технологических условиях, а именно в автоклаве. То есть такой материал можно изготовить только в специально оборудованном цехе.

Пенобетон имеет пористую структуру с преобладанием замкнутых пор сферической формы по всему объему в отличие от труднорегулируемой при получении анизотропной пористой структуры газобетонов. Однако пено-

бетон имеет свои недостатки: структурная прочность ниже, чем у автоклавного газобетона, влажностная усадка в 2–4 раза выше и низкая устойчивость пенобетонной массы в ранние сроки твердения. Наиболее весомым недостатком является низкая степень гидратации вяжущего в отличие от автоклавного способа производства, при котором твердение газобетонной смеси происходит как в результате гидратации вяжущего при повышенной температуре и давлении, так и в результате гидротермальной реакции взаимодействия диоксида кремния (кварцевый песок) и оксида кальция (известь). Низкая степень гидратации цемента, которая является следствием плохой кристаллизованности продуктов гидратации, может быть причиной усадки неавтоклавных пенобетонов в процессе эксплуатации. Преодолеть данный недостаток можно за счет использования ускорителей гидратации и твердения, активных минеральных добавок и снижения начального водотвердого отношения с помощью специальных добавок.

Идеологической основой новой технологии пенобетона может стать принцип производства строительных материалов из предварительно приготовленных сухих смесей. Неоспоримым достоинством изготовления и применения сухих смесей является технологическая стабильность, проявляющаяся в высокой точности дозирования, степени гомогенизации их компонентов, отсюда стабильность технологических и эксплуатационно-технических свойств конечного материала.

Анализ современного состояния производства сухих смесей в Республике Беларусь и за рубежом показал, что

при всем разнообразии сухие смеси для получения пенобетона среди них практически отсутствуют.

Целью данного исследования является разработка состава сухой смеси для изготовления из нее неавтоклавно пенобетона естественного твердения.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: исследовать влияние различных пенообразователей и минеральных добавок на плотность, структуру и прочностные характеристики пенобетона; установить оптимальные концентрации пенообразователя и минеральных добавок; разработать состав сухой смеси.

Благодаря применению сухих смесей можно добиться повышения производительности труда, стабильности составов, длительности срока их хранения без изменения свойств и расходования по мере необходимости и, как следствие, повышения качества строительных работ.

За основу для разработки сухой смеси при получении пенобетона взят портландцемент М500 Д0, не содержащий гипса.

При получении сухих смесей для производства пенобетона наиболее важным является выбор пенообразователя с максимальной кратностью пены и ее высокой устойчивостью в пеноцементной смеси и позволяющего получить пенобетон с качественной структурой (с равномерно распределенными сферическими порами одинакового диаметра). Свойства используемого пенообразователя оказывают непосредственное влияние и на технико-эксплуатационные показатели получаемого пенобетона.

В производстве ячеистых бетонов используются в основном жидкие пенообразователи из различного сырья. Применяются пенообразователи и в твердом порошкообразном виде, такие как натриевая соль алкилбензолсульфокислоты, лаурилсульфат натрия, оксиэтилованный лаурилсульфат, Ufarore, Verolan LP-50 и Verolan LP-W1 (Норвегия).

Перечисленные выше сухие пенообразователи имеют как положительные, так и отрицательные свойства. Основным недостатком большинства из них, особенно синтетических пенообразователей, является малая кратность пены и ее устойчивость во времени в пенобетонной смеси.

Эффективность пенообразователей, применяемых в технологии строительных материалов, определяется комплексом свойств, основным из которых является пенообразующая способность их в водном цементном растворе при его вспенивании. Кроме того, пенообразующие свойства зависят от его концентрации в цементной смеси, растворимости, продолжительности и интенсивности вспенивания цементного раствора, наличия различных добавок и др.

Пенобетон получали путем механического перемешивания (300 об/мин) сухой смеси с водой при водотвердом отношении (В/Т) 0,4–0,6 в течение 5 мин, последующего вспучивания с помощью миксера (2000 об/мин) в течение 2 мин и отверждения вспученной пеномассы.

Для установления оптимальных условий получения устойчивой вспененной цементной массы проведена оптимизация исследуемых пенообразователей по устойчивости вспененной цементной массы. Установлено, что наибольшей стабильностью обладает вспененная цементная масса при использовании порошкообразного пенообразователя Ufarore при его концентрации 0,5% от массы цемента.

Однако оказалось, что устойчивость вспененной цементной массы сохраняется в течение 30–40 мин, а затем начинается ее осадка с уменьшением объема на 40–50% и последующее ее твердение в течение 24 ч.

В БГУ разработана добавка Цитрат-Т [1, 2], которая позволяет повысить пластичность цементного раствора и ускорить время схватывания и твердения цементного

камня и бетона. Применение ее в составе сухой смеси (в количестве 6% от массы цемента) позволило улучшить реологические свойства вспененной цементной массы (расплав мини-конуса в присутствии 6% добавки составляет 85–50 мм, в то время как без нее – 45–48 мм), увеличить устойчивость пеномассы (осадка пеномассы не наблюдается вплоть до ее схватывания и твердения) и ускорить время схватывания (4 ч) и твердения (6 ч) по сравнению с бездобавочным пенобетоном (24 ч и более).

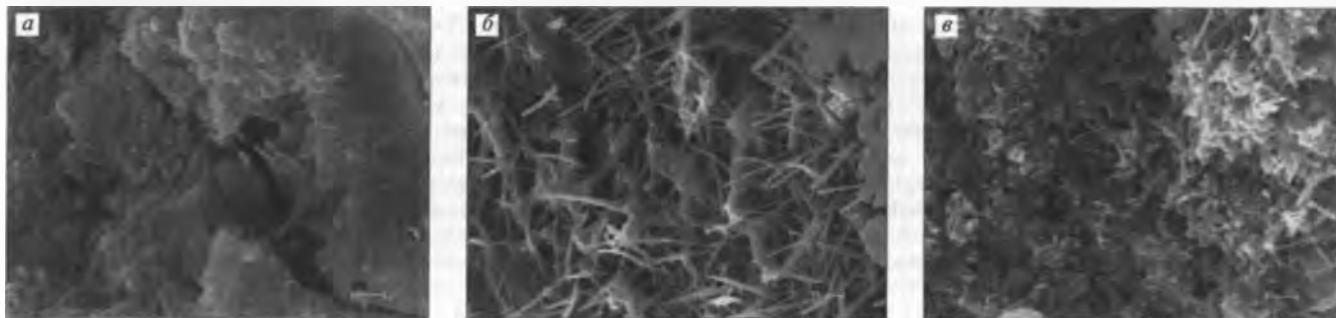
В процессе выполнения экспериментальной работы установлено, что при вспучивании сухой смеси, содержащей 6% добавки Цитрат-Т и 0,5% пенообразователя Ufarore от массы цемента при В/Т=0,4–0,6, формируется пенобетон плотностью 300–700 кг/м³, при сушке которого через 10–15 сут образуются усадочные трещины за счет образования большого количества этрингита на единицу объема пенобетона [3]. Основным компонентом образования этрингита является гидроксид кальция, выделяющийся при гидратации портландцемента. Снижение количества этрингита может быть достигнуто за счет связывания гидроксида кальция в процессе начального структурообразования пенобетона в труднорастворимые соединения. Классическим приемом связывания гидроксида кальция в цементном камне в труднорастворимые низкоосновные гидросиликаты является введение аморфного кремнезема. Упрочняющее действие микрокремнезема в пенобетонах было установлено в работах [4, 5]. Пенобетон, содержащий 5–7% микрокремнезема, имеет класс прочности, равный автоклавному газобетону.

При проведении исследования использовали микрокремнезем МК-85 – побочный продукт взаимодействия ферросилиция, который вводили в сухую смесь в количестве 1–10% от массы цемента. К увеличению прочности пенобетона приводит использование до 5% МК-85, дальнейшее повышение содержания микрокремнезема снижает прочность. Это объясняется необходимостью повышения водопотребности смеси из-за высокой удельной поверхности микрокремнезема.

Повышение прочности пенобетона при введении в его состав микрокремнезема в количестве 5% от массы цемента, по мнению авторов, связано с влиянием микрокремнезема на тиксотропные свойства системы путем изменения протяженности структурных элементов – цепочек и их перехода при контактных взаимодействиях в пространственные каркасные ячейки. Это условие соответствует минимальным значениям межфазного натяжения при максимальном развитии граничных поверхностей, что предполагает существование большого числа точечных коагуляционных контактов вплоть до создания предельного наполнения системы, в которой массовый переход к сцеплению в ближнем порядке вызывает упрочнение.

В работах [6, 7] имеются данные об использовании в составе ячеисто-бетонных смесей модифицирующих добавок, способных интенсифицировать процессы твердения пенобетона, изменять состав цементующего вещества межпоровых перегородок, что приводит к улучшению физико-механических характеристик пенобетона. К таким добавкам следует отнести добавку РСАМ, представляющую собой расширяющийся сульфалоуминатный модификатор, который дает возможность придать цементу такие свойства, как обеспечение компенсации усадочных деформаций и повышение прочности.

Установлено, что добавка РСАМ обладает расширяющим эффектом и в неавтоклавно бетоне, что позволяет использовать ее для компенсации усадки в присутствии ускоряющей и пластифицирующей добавки Цитрат-Т. Определена граничная концентрация РСАМ в количестве 5–8% от массы цемента, введение которой в сухую смесь обеспечивает проявление расширяющего эффекта при получении пенобетона.



Микроструктура поверхности скола пенобетона, полученного из сухой смеси: а – не содержащей базальтового волокна и полимерного порошка; б – содержащей дополнительно 4% базальтового волокна; в – содержащей дополнительно 4% базальтового волокна и 3% порошка Vinappas-8034

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что дисперсное армирование пенобетонов различными волокнами все более широко применяется во многих областях строительства. Безусловно, добавление в пенобетон фибры не может изменить ни плотность, ни теплопроводность этого материала. Это может сказаться на прочностных показателях: одним из основных недостатков пенобетона является его высокая хрупкость, что приводит к трещинам и сколам в блоках при работе с ними. Кроме того, для неавтоклавных пенобетонов характерны высокие усадочные деформации, что приводит к получению изделий с трещинами или вообще к их разрушению. Введение в состав пенобетона минеральных волокон позволяет устранить или по крайней мере свести к минимуму эти отрицательные изменения.

Повысить прочностные характеристики, трещиностойкость и усадочные явления пенобетонов можно за счет введения оптимального количества базальтового волокна и его равномерного распределения в пенобетонной смеси. Базальтовое волокно является побочным продуктом получения базальтового ровинга. Установлено [8, 9], что по границе пеноцементной массы и базальтового волокна, находящегося в аморфном состоянии, проходит хемосорбционное взаимодействие с появлением дополнительных новообразований, относящихся к низкоосновным гидросиликатам кальция. На поверхности тонких базальтовых волокон в местах механических дефектов создаются центры кристаллизации с образованием сети тонких гексагональных пластин и игольчатых кристаллов, срастающихся со сферическими зернами цементной системы, дополнительно усиливая действия волокна как дисперсной арматуры.

Учитывая эффективность рассмотренных выше минеральных добавок, проведено экспериментальное исследование по оптимизации состава сухой смеси на основе портландцемента, пенообразователя Ufarore (0,5%), ускоряющей и пластифицирующей добавки Цитрат-Т (6%), установлению оптимальных концентраций минеральных добавок и влиянию состава на физико-механические свойства пеноцементной массы и пенобетона. Как было установлено, оптимальными концентрациями минеральных добавок в составе сухой смеси являются (% от массы цемента): микрокремнезем МК-85 – 5%; РСАМ – 5%; базальтовое волокно – 4%. Изготовление пенобетона из такого состава сухой смеси и его отверждении позволяет получить неавтоклавный пенобетон плотностью 300–700 кг/м³ в зависимости от В/Т (0,4–0,6) и прочностью на сжатие 0,5–1,8 МПа без возникновения усадочных трещин.

Однако получаемый пенобетон обладает недостаточной прочностью, мелением поверхности и высоким водопоглощением. С целью устранения этих недостатков в состав сухой смеси вводили редиспергируемый порошок Vinappas 8094 (сополимер этилена, винилаура-та и винилхлорида).

Редиспергируемые полимерные порошки (РПП) – сухие полимеры, полученные методом распылительной сушки латексной дисперсии в воде [10]. Используются в основном в сухих строительных смесях, растворах которых придают повышенную прочность контактного сцепления компонентов и улучшают гидрофобные свойства. При затворении водой они вновь образуют водные полимерные дисперсии. В процессе образования водно-цементного геля пенобетона и его отверждения частицы дисперсии образуют пленки. Эти полимерные пленки находятся в полостях и пустотах затвердевшего пенобетона и повышают его прочность. Пленки полимера проявляют хорошую адгезию к затвердевшим частицам компонентов пенобетона, что обеспечивает их прочное прикрепление к цементной структуре. Таким образом, в материале возникают две структуры: цементный каркас пенобетона и армирующая сетка из полимерных пространственных пленок, которые работают совместно и обеспечивают требуемые эксплуатационные свойства пенобетона.

Как показало исследование, введение в состав сухой смеси порошка Vinappas-8094 в количестве 3% от массы цемента приводит к снижению меления поверхности пенобетона, увеличению на 50–100 кг/м³ плотности, в 1,5–2 раза – его прочности при сжатии и уменьшению на 40–50% водопоглощения.

Проведенное с помощью микроскопа Leo-1420 исследование микроструктуры поверхности сколов пенобетона показало, что введение в состав сухой смеси на основе портландцемента, пенообразователя Ufarore и минеральных добавок (сульфоалюминатная добавка РСАМ, микрокремнезем МК-85, базальтовое волокно), а также добавки Цитрат-Т и порошка Vinappas-8034 приводят к изменению морфологии кристаллогидратов в сторону образования более мелких игольчатых кристаллов (см. рисунок).

Как видно из приведенных на рисунке микрофотографий сколов пенобетона, введение полимерного порошка Vinappas-8034 способствует формированию более мелкодисперсных кристаллогидратов, что позволяет целенаправленно изменять их морфологию и дает возможность управлять процессом структурообразования пенобетона.

Таким образом, в результате проведенной работы, подобран состав сухой смеси на основе портландцемента, пенообразователя Ufarore, ускоряющей и пластифицирующей добавки Цитрат-Т, микрокремнезема МК-85, сульфоалюминатной добавки РСАМ, базальтового волокна и полимерного порошка Vinappas-8034, при затворении которой водой при В/Т 0,4–0,6, последующим механическим вспучиванием (2000 об/мин) и отверждении пеномассы формируется неавтоклавный пенобетон плотностью 400–800 кг/м³ (в зависимости от В/Т), прочностью 1,1–3,4 МПа, с низким водопоглощением (50–60%), отсутствием усадочных трещин и близкий по свойствам к автоклавному пенобетону.

Список литературы

1. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Беланович А.Л., Шукин Г.Л., Савенко В.П., Карпушенков С.А. Пролонгация срока годности растворяемых смесей // *Строительные материалы*. 2012. № 10. С. 74–77.
2. Патент РБ 18077. *Способ получения ускорителя отверждения для бетонов и строительных растворов* / Савенко В.П., Шукин Г.Л., Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Беланович А.Л., Радюкевич П.И., Карпушенков С.А. Заявл. 12.04.2012. Опубл. 30.04.2014. Бюл. № 2.
3. Величко Е.Г., Комар А.Г. Рецептурно-технологические проблемы пенобетона // *Строительные материалы*. 2004. № 3. С. 26–29.
4. Удачкин И.Б. Ключевые проблемы развития производства пенобетона // *Строительные материалы*. 2002. № 3. С. 8–9.
5. Урханова Л.А. Использование вторичного сырья для производства пенобетона // *Строительные материалы*. 2008. № 1. С. 34–35.
6. Безрукова Т.Ф. Добавки в ячеистый бетон. М.: ВНИИЭСМ, 1990. 37 с.
7. Сердюк В.Р., Вахитов С.Г. Интенсификация структурообразования и отверждения ячеистых бетонов // *Промышленность строительных материалов. Серия 8. Промышленность автоклавных материалов и местных вяжущих*. 1983. Вып. 11. С. 13–15.
8. Василевская Н.Г., Енгджиевская И.Г., Калугин И.Г. Цементные композиции, дисперсно-армированные базальтовой фиброй // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2011. № 3. С. 153–158.
9. Василевская Н.Г., Енгджиевская И.Г., Калугин И.Г. Управление структурой ячеистых фибробетонов // *Известия вузов. Строительство*. 2010. № 11–12. С. 17–20.
10. Голуков С.А. Модификация плиточных клеев дисперсными полимерными порошками VINNAPAS // *Строительные материалы*. 2004. № 3. С. 47–49.

References

1. Leonovich S.N., Sviridov D.V., Belanovich A.L., Shchukin G.L., Savenko V.P., Karpushenkov S.A. Extension of life mortars. *Stroitel'nie Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 10, pp. 74–77. (In Russian).
2. Patent BY 18077. *Sposob polucheniya uskoritelya tverdeniya dlya betonov i stroitel'nykh rastvorov* [A method for producing a hardening accelerator for concrete and mortar]. Savenko V.P., Shchukin G.L., Leonovich S.N., Sviridov D.V., Belanovich A.L., Radyukevich P.I., Karpushenkov S.A. Declared 12.04.2012. Published 30.04.2014. Bulletin No. 2. (In Russian).
3. Velichko E.G., Komar A.G. Prescription and technological problems of the foam concrete. *Stroitel'nie Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 3, pp. 26–29. (In Russian).
4. Udachkin I.V. Key issues in the development of the production of foam concrete. *Stroitel'nie Materialy* [Construction Materials]. 2005. No. 3, pp. 8–9. (In Russian).
5. Urhanova L.A. The use of secondary raw materials for the production of foam concrete. *Stroitel'nie Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 1, pp. 34–35. (In Russian).
6. Bezrukova T.F. *Dobavki v yacheistii beton* [Additives in cellular concrete]. Moscow: VNIIESM. 1990. 37 p.
7. Serdyuk V.P., Vahitov S.G. Intensification of structure formation and hardening of porous concrete. *Promishlennost' stroitel'nykh materialov. Seriya 8. Promishlennost' avtoklavnykh materialov i mestnykh vyazhushchih*. 1983. Vol. 11, pp. 13–15. (In Russian).
8. Vasilevskaya N.G., Engzhievskaya I.G., Kalugin I.G. The cement compositions reinforced by a disperse basalt fiber. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011. No. 3, pp. 153–158. (In Russian).
9. Vasilevskaya N.G., Engzhievskaya I.G., Kalugin I.G. Management of structure of cellular fibrous concrete. *Izvestiya Vuzov. Stroitel'stvo*. 2010. No. 11–12, pp. 17–20. (In Russian).
10. Golukov S.A. Modification of tile adhesives particulate polymeric powders VINNAPAS. *Stroitel'nie Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 3, pp. 47–49. (In Russian).