

А. Н. ПШИНЬКО, А. В. КРАСНЮК, С. А. БЫЧКОВ (ДИИТ)

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА И СПОСОБОВ МОДИФИКАЦИИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ НА НЕОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ И ЗАПОЛНИТЕЛЯХ

У статті наведено детальний аналіз сучасних технологій виробництва і способів модифікації легких бетонів на неорганічних в'язучих і заповнювачах. Визначено основні шляхи оптимізації і вдосконалення технологій виробництва легких бетонів.

*Ключові слова:* легкі бетони, неорганічні в'язучі і заповнювачі, оптимізація і вдосконалення технологій виробництва

В статье приведен детальный анализ современных технологий производства и способов модификации легких бетонов на неорганических вяжущих и заполнителях. Определены основные пути оптимизации и совершенствования технологий производства легких бетонов.

*Ключевые слова:* легкие бетоны, неорганические вяжущие и заполнители, оптимизация и совершенствование технологий производства

In the article the detailed analysis of advanced production technologies and modification methods of light concretes on inorganic astringents and fillers is presented. The basic ways of optimization and improvement of production technologies of the light concretes are determined.

*Keywords:* light concretes, inorganic astringents and fillers, optimization and improvement of production technologies

### Введение

Развитие производства легких бетонов для ограждающих конструкций жилищного строительства стало возможным благодаря наличию в Украине промышленных предприятий по производству искусственных пористых заполнителей. Наиболее распространенным видом искусственных пористых заполнителей является керамзитовый гравий, занимающий до 80 % общего объема производства. Однако, переход к новой экономической концепции, связанной с всемерной экономией энергоресурсов, резко затормозил развитие производства легких бетонов.

С одной стороны, используемые в малоэтажном жилищном строительстве, легкие бетоны отличались значительной средней плотностью и относительно высокой теплопроводностью, а с другой стороны - повышенным расходом цемента и дорогостоящего керамзита [1].

### Постановка задач исследований

Для развития малоэтажного жилищного строительства необходим экономичный легкий бетон с принципиально новыми свойствами, и, в частности, со значительно пониженной теплопроводностью. Для этого должны быть решены следующие задачи исследования:

- созданы легкие бетоны марок 25...50 со

средней плотностью до 1100 кг/м<sup>3</sup> с улучшенными теплоизоляционными свойствами;

- повышена эффективность и режим энергосбережения легких бетонов путем снижения в них расходов цемента и пористого заполнителя (керамзита);

- обеспечено использование в них попутных материалов добычи и вторичного сырья промышленности.

Но перед решением поставленных задач исследований необходимо провести анализ современных технологий производства и модификации легких бетонов на неорганических вяжущих и заполнителях.

### Научные результаты

Модифицирование свойств ячеистобетонной смеси введением в нее пористого наполнителя предложено в тридцатых годах. Это направление поддержал и развил Б. Г. Скрамтаев [2]. Первые экспериментальные доказательства эффективности данного технологического приема были выполнены в 1938 году проф. Н. А. Поповым [3].

В 1964 году в г. Харькове, Красноярске, Ачинске начат выпуск керамзитогазобетонов [4], затем производство керамзитобетона было налажено в Донбассе, Воркуте, Днепрпетровске и других местах [5]. Поризованные легкие бетоны выпускались более чем на 30 заводах

СНГ. Годовой объем производства этих видов бетонов превысил к 1991 году 40 млн м<sup>3</sup>, что составляет около 20 % применяемого бетона [6].

Наиболее широко поризованные легкие бетоны использовались в жилищном строительстве – 80 %, в промышленном – 15 % и сельскохозяйственном – около 5 % [7]. Особенно эффективно применение модифицированных легких бетонов в малоэтажном жилищном строительстве.

Применяются поризованные легкие бетоны в производстве ограждающих конструкций, панелей, покрытий и перекрытий, теплоизоляционных изделий.

Наибольшее развитие за рубежом легкие бетоны получили в Англии, Австрии, Австралии, Чехословакии, Германии, Японии, США.

Для изготовления бетонов этих видов используются следующие типы заполнителей:

- естественные: пемза и туф (вулканические);
- вспученные: керамзит, вермикулит, аглопорит, перлит, сланец;
- искусственные, из отходов промышленности: котельный шлак, пемза, зола ТЭЦ, зольный гравий.

С целью совершенствования технологии производства легких бетонов в Украине ведутся поиски наиболее эффективных исходных материалов и оптимальных составов бетона, рациональных условий хранения и способов подачи сырьевых материалов в смеситель, обеспечивающих сохранность и однородность свойств смеси, а также высокое качество готовых изделий.

Анализируя применяемые для производства поризованных легких бетонов исходные материалы, можно отметить, что, в зависимости от требуемой марки бетона и технологии производства изделий, применяются вяжущие воздушного, гидравлического и автоклавного твердения.

Наиболее широко в технологии поризованных легких бетонов применяются гидравлические вяжущие, в частности, цементы на основе портландцементного клинкера (портландцемент, быстротвердеющий цемент БТЦ, шлакопортландцемент, быстротвердеющий шлакопортландцемент ШБТЦ). При производстве керамзитобетонов преимущество отдается алитовым малоалюминатным цементам с началом схватывания не позднее 6 часов, концом – 9 часов, с нормальной густотой до 27 %. Количество растворимых щелочей не более 0,3 %, а окиси хрома не более 0,1 %.

Выбор вида и марки цемента производится с учетом условий твердения бетона. Так, для получения конструкционно-теплоизоляционного поризованного бетона при тепловлажностной обработке путем пропаривания применяются цементы М400 и выше. При этом расход цемента составляет 220...380 кг.

В связи с необходимостью экономии сырьевых ресурсов большое внимание уделяется поиску возможностей снижения расхода вяжущего при одновременном снижении плотности легкого бетона.

По данным НИИЦементов и НИИЖБа применение портландцементов М500-600 по сравнению с М400 сокращает расход цемента на 15...20 % и сроки тепловой обработки на 3...4 часа, при этом увеличивается производительность технологических линий [8].

Обработка цемента путем дополнительного помола сухим или мокрым способом (помол с водой), а также введением добавок способствует снижению водопотребности и водоудерживающей способности вяжущего, что позволяет улучшить формуемость, удобоукладываемость и однородность смеси. Помол с ПАВ позволяет избежать нехватки вяжущего в неудобоукладываемых смесях за счет увеличения его объема воздухом. Снизить расход цемента от 13 до 31 % позволяет вибродомол вяжущего.

Также целесообразным является применение в производстве легких бетонов портландцементов, содержащих добавки шлаков и зол, т.к. эти добавки имеют аморфное стекловидное строение, а, следовательно, меньшую теплопроводность. В результате цементный камень из шлакопортландцементов характеризуется лучшими теплотехническими свойствами, а также большей стойкостью в агрессивных средах.

Известно, что применение химических добавок в производстве сборного железобетона существенно регулирует свойства бетонной смеси и затвердевшего бетона. Наряду с улучшением физико-технических свойств добавки позволяют снизить расход воды, а, следовательно, и цемента, сократить сроки тепловой обработки бетона и трудовые затраты. В настоящее время более 30 % бетонных смесей изготавливаются с химическими добавками. Наиболее часто применяемыми пластифицирующими добавками являются мылонафт, ССБ, С-3, СДБ, ГКЖ-11, ГКЖ-94 и другие.

Введение в легкие бетонные смеси гидрофобизирующих кремнийорганических жидкостей различного вида и ряда других химических добавок пластифицирует бетонную смесь, что

приводит к уменьшению водопотребности на 7...12 % с соответствующим снижением расхода цемента на 5...7 %, повышению однородности бетона, средней плотности и улучшению ряда других свойств. Добавки такого типа способствуют модификации структуры, что в совокупности с гидрофобизацией приводит к снижению капиллярного подсоса и водопоглощения, а, следовательно, повышению морозостойкости и долговечности. Отрицательным действием гидрофобно-пластифицирующих добавок является торможение процессов твердения бетонной смеси.

Временному разжижению смеси без увеличения расходов цемента и воды способствуют суперпластификаторы. Введение в бетонную смесь суперпластификаторов в количестве 1...3 % от массы цемента сокращает расход воды в равнопластичных смесях на 20...30 % и цемента на 10...20 %.

Значительный экономический эффект дает замена части цемента тонкомолотыми минеральными заполнителями, т.к. известно, что затвердевший цементный камень содержит большое количество негидратированных зерен цемента, которые могут быть заменены в целях экономии соответствующими фракциями микрозаполнителя.

Дисперсный наполнитель с момента затвердения оказывает в цементном тесте структурообразующее действие, ускоряя тем самым процессы гидратации и твердения цементного камня. Такое действие дисперсных наполнителей объясняется тем, что частицы наполнителя, располагаясь между отдельными зёрнами цемента, раздвигают их и увеличивают к ним доступ воды. Образующиеся продукты гидратации распределяются в большем объеме, т.к. осуществляется отвод их из зоны реакции к поверхности частиц наполнителя.

В качестве наполнителей используют молотые: туф, мел, известняки, диатомит, шлаки, аглопорит, гранит, кварцевые пески и ряд других материалов.

Исследования показывают, что прочность цементного камня при различном водосодержании смеси зависит от тонкости помола цемента и наполнителя, а также от контактных сил сцепления между зёрнами микрозаполнителя и продуктами гидратации портландцемента. Тонкодисперсные фракции участвуют в образовании цементного геля, более грубые, вследствие продолжающейся гидратации цемента, отсасывают воду из ранее образовавшихся пористых гелей, что приводит к затвердению цементного камня.

Оценивая применяемые для производства легких бетонов вяжущие, необходимо отметить, что:

- в основном для изготовления данного вида бетонов используют портландцемент и шлакопортландцемент марок 400 и 500 в количестве 220...380 кг/м<sup>3</sup>;

- уменьшение объема связующего в легком бетоне резко ухудшает его структуру (приводит к созданию крупнопористой структуры), а, следовательно, и свойства;

- актуальным является вопрос использования активированных молотых минеральных наполнителей для замены части цемента в связующем без уменьшения его объема.

Наряду с вяжущим, основным компонентом легких бетонов является заполнитель.

В Украине примерно 80 % общего объема производства искусственных пористых заполнителей приходится на долю керамзитового гравия, оставшуюся часть занимают глинозольный керамзит, керамзитовый песок, аглопорит, перлит, перлитовый песок, шлаковая пемза, зольный гравий и другие материалы.

Оценивая качество пористых заполнителей, можно отметить, что в целом оно не отвечает требованиям предприятий сборного железобетона и индустриального домостроения, а также зарубежному уровню. Основным недостатком является высокая средняя плотность, превышающая 550 кг/м<sup>3</sup>.

Так, на ряде предприятий из-за низкого качества местных глин насыпная плотность керамзитового гравия составляет 600...700 кг/м<sup>3</sup>, что позволяет получить по обычной технологии керамзитобетон со средней плотностью 1200 кг/м<sup>3</sup> марки 75, вместо 900 кг/м<sup>3</sup> по нормативным требованиям.

Известно, что более легкий керамзитовый гравий стоит дороже, однако он обеспечивает получение материалов с надежной теплозащитой, т.е. более дешевых в длительной эксплуатации.

Для снижения средней плотности керамзитового гравия применяются в качестве вспучивающих добавок соляровые масла – отходы целлюлозно-бумажной промышленности. Особо легкий керамзитовый гравий получают, используя опудривающие добавки из огнеупорных материалов.

Около 70 % предприятий выпускают нефракционированный керамзитовый гравий, использование которого приводит к получению бетона крупнопористой структуры, а также перерасходу цемента на 20...40 %.

Основным направлением улучшения фракционного состава керамзита является применение более совершенного грависортировочного оборудования, уменьшение процента несортированного гравия, а также снижение содержания фракции 20...40 мм до нормативного.

Проблема пористого песка – важнейшая в технологии легких бетонов. Качественные пористые пески не занимают главенствующего положения в производстве пористых заполнителей, составляя 5...10 % (вместо необходимых 40 %), поэтому преобладают плотные днепровские пески. Потребность строительства в пористых песках удовлетворяется, главным образом, за счет дробления крупных фракций керамзита и спеков. Расход гравия на 1 м<sup>3</sup> песка составляет 1,5...1,8 м<sup>3</sup>, что приводит к удорожанию такого рода песка по сравнению с получаемым в обжиговых печах, ухудшению качества бетона и повышению его стоимости на 5...10 %.

Значительно ухудшает свойства заполнителя открытое хранение на площадках. Хранение пористых заполнителей в закрытых складах – непереносимое условие получения бетона высокого качества. Заполнитель должен оставаться сухим вплоть до момента загрузки его в смеситель. Увлажнение заполнителя на предшествующих этапах нежелательно, поскольку такой прием затрудняет поддержание заданной консистенции смеси и обычно приводит к увеличению водопотребности легкого бетона.

Раздельное хранение и дозирование пористого заполнителя по фракциям – второе условие обеспечения высокого качества бетона. Смесь даже двух смежных фракций (5...10 мм и 10...20 мм), взятых в неоптимальной пропорции в больших объемах приводит к расслоению смесей. Особенно склонны к расслоению смеси на керамзите и других гравиеподобных заполнителях. При загрузке расходных бункеров крупные зерна откатываются в сторону от места падения, а мелкие стремятся переместиться на дно бункера ближе к выходному отверстию. Это вызывает недопустимые колебания гранулометрического состава заполнителей от замеса к замесу. Отчасти положение может быть исправлено способом объемно-весового дозирования, который успешно применяется на ряде заводов. Крупный заполнитель дозируют по объему в весовых дозаторах. Колебания насыпной плотности крупного заполнителя компенсируются изменением расхода песка.

Для конструкционно-теплоизоляционных бетонов рекомендована предельная крупность гравия и щебня 20 мм. Минимальный размер

зерен – 5 мм. Следовательно, смесь фракций 5...10 мм – является оптимальной. Остается неясным вопрос о наилучшем соотношении в этой смеси фракций 5...10 мм и 10...20 мм. Рекомендации отдельных исследователей по этому вопросу весьма противоречивы.

Зерновой состав песка также регламентирован – принят максимальный размер зерен песка в 5 мм. Таким образом, заранее предопределена непрерывная гранулометрия смеси пористого гравия и песка без исключения каких-либо фракций.

Ориентировка на непрерывную гранулометрию пористых заполнителей в конструкционно-теплоизоляционном бетоне не всегда оправдана, особенно для поризованных бетонов, т.к. использование песка повышает среднюю плотность бетонов, увеличивает их теплопроводность. Теплопроводность во многом определяется структурой заполнителя, занимающего в объеме бетона до 80 %.

Строение гранулы керамзита зависит от качества и режима обжига. Чем выше коэффициент вспучивания, тем неоднороднее зерно, разделяющееся на плотную оболочку и пористое ядро. Толщина оболочки изменяется от 1 до 3 мм. Толстая оболочка представляет собой обойму пористого и слабого ядра и поэтому повышает прочность керамзита.

Прочность гранулы зависит от характера пористости. Наиболее благоприятны закрытые поры и поры мелкого размера. Гранула, имеющая такой характер пористости, имеет высокую прочность, низкое водопоглощение и газопроницаемость.

Наличие в керамзите закрытых пор приводит к тому, что для полного насыщения его водой требуется длительное время. Содержащийся в порах воздух не выходит полностью из керамзита, а лишь сжимается под действием капиллярных сил. Защемленный воздух при нагревании способствует перераспределению влаги между заполнителем и цементным камнем. Возникает градиент давления, приводящий к упругому расширению бетона.

При малоэтажном жилищном строительстве возникает острая потребность в экономичных легких бетонах, пониженной теплопроводности, что требует увеличения выпуска высококачественных пористых искусственных заполнителей. Успешное выполнение этой задачи осложняется дефицитом природных сырьевых ресурсов. В настоящее время стоит задача создать новые эффективные ресурсосберегающие технологические процессы получения пористых заполнителей. Основным сырьем для полу-

чения пористых заполнителей в Украине должны стать отходы угледобывающей промышленности, шлаки и золы ТЭЦ. В связи с этим необходимо организовать производство искусственных пористых заполнителей:

- при металлургических и некоторых заводах химической промышленности (шлаковая пемза из доменных и фосфорных шлаков);

- вблизи электростанций, работающих на угле (аглопоритовый гравий, щебень и песок на основе золы ТЭС);

- в районах месторождений хорошо вспучивающихся глин (керамзитовый гравий и песок).

В последнее время работами ряда исследователей получены из глин, пеплов, отходов промышленности высококачественные заполнители со средней плотность 300...500 кг/м<sup>3</sup> и пределом прочности на сжатие в цилиндре 0,5...2,5 МПа. Разработаны методики получения глинозольного керамзита и некоторых других видов заполнителей.

Однако, основным видом заполнителя в поризованных легких бетонах остается керамзитовый гравий, получаемый по энергосберегающей технологии, удовлетворяющий нормативным требованиям для конструктивно-теплоизоляционных бетонов требуемой средней плотности. К недостаткам выпускаемого в Украине керамзитового гравия следует отнести несоответствие его нормативам по зерновому составу. Поэтому необходим поиск технологических решений, позволяющих снизить зависимость средней плотности легкого бетона от насыпной плотности керамзитового гравия. Одним из таких способов является модификация растворной части керамзитобетона путем поризации.

Для производства поризованных легких бетонов используют воздухововлекающие, газо- и пенообразующие, а также комплексные добавки (воздухововлекающие одновременно с газообразующими).

Из газообразующих добавок наибольшее применение в Украине и за рубежом нашла алюминиевая пудра, марок ПАП-1 и ПАП-2 согласно ГОСТ 5494. Пудра представляет собой частицы пластинчатой формы с внешней оболочкой из 1,5...7 слоев ориентированных молекул жирных кислот и продуктов их взаимодействия с окисной поверхностью металластеаратов алюминия. Наличие жировой пленки на поверхности частиц алюминия приводит к всплыванию их в жидкой среде, что является отрицательным качеством при использовании пудры в производстве поризованных бетонов.

Для удаления жировой пленки и смачивания частиц применяются различные виды обработки пудры.

Одним из наиболее широко применяемых ранее методов являлось прокаливание алюминиевой пудры в электрических печах при температуре 160...200 °С в течение 4...6 часов. Однако, этот процесс взрывоопасен, длителен и энергоемок, т.к. требует соблюдения правильного температурного режима прокаливания, осторожности и значительного расхода энергоресурсов.

Поэтому в последнее время прокаливание заменено гидрофилизацией алюминиевой пудры в водных растворах поверхностно-активного вещества (ПАВ). В качестве омылителей алюминиевой пудры применяют: сульфолон НП-5, хозяйственное мыло, а также группы катионоактивных ПАВ, неионогенных ПАВ и бинарные смеси.

Основным свойством алюминиевой пудры для производства поризованных легких бетонов является ее эффективная газообразующая способность, характеризующаяся следующими показателями: объемом выделившегося газа во время реакции, коэффициентом использования газообразователя, интенсивностью газовыделения и химической константой реакции. Газообразующая способность пудры зависит от ее физико-химических характеристик и свойств реакционной среды (щелочность, температура, наличие ПАВ).

В результате исследований свойств алюминиевой пудры было установлено, что для обеспечения удовлетворительной газообразующей способности пудры содержание в ней активного алюминия должно быть не менее 82 %, жиров - не более 0,3 %, удельная поверхность не менее 6500 см<sup>2</sup>/г, а количество частиц, проходящих через сито 0042 – 99,5 %.

Установлено также, что по форме частицы должны приближаться к шару или правильному многограннику. Монодисперсный состав порошка должен характеризоваться узким интервалом распределения частиц по размерам. Сами же частицы должны обладать гидрофильными свойствами и слабоокисленной поверхностью.

Перспективным направлением улучшения свойств газообразователей, на основе алюминиевой пудры, является создание высокотехнологичных долго сохраняющих газообразующие свойства паст.

С целью регулирования реакций газовыделения используют различные добавки: NaOH, NaCl, NH<sub>4</sub>Cl, K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> и многие другие.

Кроме алюминиевой пудры в качестве газообразователей можно использовать перекись

водорода (пергидроль), карбид кальция или бария, азотсодержащие соединения, ферросилиций, а также тонкодисперсные порошки цинка, магния, бария, лития. Широкого применения в Украине эти вещества не нашли по причине их дефицитности и большой стоимости.

Этап формирования смеси – один из важнейших в технологии производства поризованных легких бетонов. На этом этапе наибольшее внимание уделяется изысканию способов управления процессами порообразования, улучшения качества поровой структуры и повышению однородности смеси.

Рассматривая способы поризации легкобетонной смеси, необходимо выделить из них три основных: химический, механический и комплексный.

При химическом способе поризации смеси процесс образования пор идет за счет химической реакции газообразователя с компонентами смеси.

Поризация газом снижает среднюю плотность бетона за счет регулирования высоты заливки смеси в форму и высокой степени воздухомасштащения (до 25 %).

Нормальное протекание реакции газообразования происходит при температуре смеси 35...45 °С. Разогрев смеси производится с помощью горячей воды затворения (80 °С), электроподогрева смеси в бункере, электроподогрева смеси в форме. Необходимость разогрева смеси значительно усложняет технологию приготовления керамзитогазобетона, поэтому постоянно ведется разработка и совершенствование технологий изготовления легких бетонов.

### Выводы

Как показывает выполненный аналитический обзор, существует множество направлений, связанных с оптимизацией и совершенствованием технологий производства легких бетонов, однако на наш взгляд более важными являются вопросы исследования системы «цемент-наполнитель» и эффективная поризация цементного камня.

Поскольку значительная часть цемента в некоторых бетонных смесях используется лишь для придания им необходимых технологических свойств. Современные представления о закономерностях физико-химических взаимодействий в системе «цемент-наполнитель» свидетельствуют, что последний, как структурный элемент, способен также участвовать в процессах формирования структуры и физико-технических свойств, как цементного камня, так и легкого бетона. Этим обуславливается

целесообразность замены части клинкера вяжущего дисперсным наполнителем, в частности, мелкодисперсными шламами, песками и другими отходами горнообогатительной промышленности Украины.

Считается, что процесс измельчения горной породы приводит к измельчению его кристаллической структуры, при этом кварцевые частицы становятся частично аморфными, возрастает их реакционная способность. Таким образом, введение в цемент мелкодисперсного шлама в оптимальном количестве и оптимальной дисперсности может способствовать повышению прочности цементного камня и, в конечном итоге, комплексно улучшить конструктивно-технические свойства конструктивно-теплоизоляционного керамзитогазобетона для малоэтажного строительства. Таким образом, есть возможность значительно повысить экономичность легкого бетона за счет снижения расхода портландцементного вяжущего, использованием в нем мелкодисперсных шламов ГОК с одновременной поризацией цементного камня, что обеспечит существенное улучшение теплозащитных свойств бетона.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бычков, С. А. Высокоэффективный легкий бетон для малоэтажного строительства [Текст] / С. А. Бычков. – Д., 1997. – 68 с.
2. Скрамтаев, Б. Г. Теория прочности бетона и новые виды бетонов [Текст] / Б. Г. Скрамтаев. – Х.: Гос. науч.-техн. изд-во УССР, 1934. – 217 с.
3. Попов, Н. А. Строительные материалы [Текст] / Н. А. Попов. – М.: Стройиздат, 1941. – 421 с.
4. Киселев, Д. П. Керамзитобетон – эффективный стеновой материал [Текст] / Д. П. Киселев, А. А. Кудрявцев, И. А. Солодухин // Технология легких бетонов на пористых заполнителях и применение их в строительстве. Сб. статей. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 63-64.
5. Меркин, А. П. Принципы формирования ячеистой структуры суперлегких строительных материалов [Текст] / А. П. Меркин, А. Н. Филатов // Бетон и железобетон. – 1985. – № 5. – С. 20-21.
6. Орендлихер, Л. П. Бетоны на пористых заполнителях в сборных железобетонных конструкциях [Текст] / Л. П. Орендлихер. – М.: Стройиздат, 1983. – 141 с.
7. Ильяшенко, В. А. Опыт производства легкобетонных конструкций [Текст] / В. А. Ильяшенко // Бетон и железобетон. – 1983. – № 6. – С. 3-4.
8. Спивак, Н. Я. Производство крупнопанельных ограждающих конструкций зданий из керамзитобетона [Текст] / Н. Я. Спивак. – М.: Стройиздат, 1961. – 116 с.

Поступила в редколлегию 10.06.2010.  
Принята к печати 22.06.2010.