

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ СО ВТОРИЧНЫМИ РЕСУРСАМИ ДНЕПРОВСКОГО РЕГИОНА

Розглянуто проблеми утилізації місцевих вторинних продуктів промисловості в легких бетонах та підвищення ефективності використання цементу забезпеченням раціонального зернового складу компонентів.

Изложены проблемы утилизации местных вторичных продуктов промышленности в легких бетонах и повышения эффективности использования цемента обеспечением рационального зернового состава компонентов.

The problems of utilization of the local industry after-products in the easy concretes and efficiency improvement for using the cement by providing of rational grain composition of the components are presented.

Постановка проблемы

Проектирование составов легких бетонов, в которых утилизируются местные вторичные продукты, обеспечиваются минимально необходимый расход цемента и требуемые физико-механические характеристики является сложной задачей. Одним из вариантов использования таких бетонов является устройство стяжек под полы в жилых и общественных зданиях. В соответствии с требованиями п. 5.4 СНиП 2.03.13-88 [1] легкий бетон стяжек, выполняемых для обеспечения нормированного теплоусвоения пола, по прочности на сжатие должен соответствовать классу В5. А в качестве теплоизоляции рекомендуется применять керамзитобетон классов от В3,5 до В7,5. Этим нормативным документом рекомендуется для получения таких бетонов использовать местные строительные материалы и отходы промышленного производства. Кроме того, такой бетон может обеспечить также и требования к полу по звукоизоляции.

Анализ последних исследований и определение нерешенных проблем

Легкий бетон является классическим композиционным материалом. Поэтому целесообразно использовать общие предпосылки и закономерности для формирования его структуры и свойств [2]. При проектировании составов легких бетонов, в том числе и утилизации в них вторичных продуктов промышленности, используются различные подходы [3–5]. Но общепринятой методики определения количества каждого компонента нет. Нам представляется целесообразным рассмотреть эту проблему с позиций обеспечения рационального зернового

состава компонентов. Реализацией этого подхода при определении составов тяжелых бетонов подтверждена его эффективность [6, 7].

Цель проведенных исследований

Определить возможность получения легких бетонов, применяемых преимущественно для стяжек и теплоизоляции в конструкциях пола, из местных материалов, в том числе вторичных продуктов промышленности. Обязательным условием является обеспечение требуемых физико-механических характеристик при минимальном расходе цемента.

Основной материал исследований

В качестве вяжущего использовали Криворожский портландцемент П/Б-Ш-400, удовлетворяющий требованиям ДСТУ Б В.2.7-46-96. Активность цемента по ГОСТ 310.4-81 составляла около 21...24 МПа. Нами специально применялся лежалый цемент, потерявший значительную часть активности, чтобы определить возможность и эффективность его использования в бетонах низкой прочности с наполнителями из местных вторичных продуктов промышленности.

Для модификации бетонов, в частности, улучшения удобоукладываемости, применяли комплексные добавки местного производства ПЛКП, выпускаемые в соответствии с требованиями ТУ УВ.2.7-24.6-312244931-001:2005.

В качестве добавки-наполнителя использовали золу-уноса Приднепровской ГРЭС. Ее удельная поверхность (зерновой состав) изменяется от 200 до 700 м²/кг по Блейну. Много в этой золе, по сравнению с другими золами, например по требованиям ГОСТ 25818-91, а также золе-уноса Ладьжинской ГРЭС, негорев-

ших остатков – от 12 до 20 %. Соответственно от 20 до 40 % изменяется и водопоглощение. Эти характеристики золы-уноса Приднепровской ГРЭС могут существенно влиять на свойства бетонной смеси и физико-механические характеристики затвердевшего бетона.

В качестве заполнителей использовали керамзитовый гравий, насыпной массой 450 кг/м³, состоящий из зерен крупностью от 5 до 20 мм,

граншлак завода им. Петровского, насыпная масса которого составляла 880 кг/м³. В качестве мелкого заполнителя использовали песок кварцевый речной средней плотностью породы 2630 кг/м³, насыпной плотностью 1550 кг/м³, пустотностью 41 %, модуль крупности 1,56. Содержание вредных примесей в пределах нормы. Результаты рассева песка и граншлака приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зерновой состав граншлака и песка

Остатки	Диаметр отверстий сит, мм						
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	дно
Песок							
Частные, %		1,0	2,4	7,85	37,9	42,05	8,8
Полные, %		1,0	3,4	11,25	49,15	91,2	100,0
Граншлак							
Частные, %	2,5	30,5	32,5	18,5	11,0	2,0	3,0
Полные, %	2,5	33,0	65,5	84,0	95,0	97,0	100,0

Эффективность введения в составы легких бетонов золы-уноса Приднепровской ГРЭС определяли на составах с применением вышеприведенных компонентов. Для расчета расхода каждой составляющей использовали ранее разработанную и апробированную методику [8], в основу которой положен принцип обеспечения минимальной пустотности бетонной смеси. Проведенными ранее исследованиями установлены два основных критерия, выполняя которые можно обеспечить минимальную пустотность смеси, а следовательно, наиболее эффективное использование цемента. Первый – средний размер зерен ближайших фракций большей к меньшей должен составлять примерно 10:1, а для трехфракционной бетонной смеси крупной к средней и к мелкой: 100:10:1. Второй – соотношение объемов этих фракций для двухфракционной смеси крупной к мелкой равно 70:30, а для трехфракционной крупной к средней и к мелкой равно 52:23:25.

В составе мелкой фракции необходимо наряду с цементом учитывать мелкозернистую составляющую, которая вносится с заполнителями, а также дополнительно вводимую с вторичными мелкозернистыми продуктами промышленности. Если плотность зерен применяемых компонентов примерно равна, то это соотношение можно выдерживать по массе, но если отличается более чем на 20 %, то, дозируя компоненты по массе, необходимо учитывать

это отличие соответствующим коэффициентом. Решающее значение в обеспечении рационального зернового состава компонентов имеет соотношение объемов занимаемых каждой фракцией.

Для реализации этого принципа на начальном этапе определения расхода каждой составляющей проанализирован ее зерновой состав. К крупным фракциям нами отнесены зерна размером более 2,5 мм, к средним отнесены зерна, которые прошли через сито с размером ячейки 2,5 мм, но не прошли через сито с размером ячейки 0,16 мм, а к мелким – мельче 0,16 мм.

Содержание каждой из выделенных фракций по установленному критерию, которое определялось по результатам рассева на стандартных ситах, в использованных материалах следующее. Керамзит имеет только крупную фракцию, а зола-уноса и цемент только мелкую. Граншлак имеет крупной фракции (Кгшр) 33,0 %, средней (Сгшр) 64,0 %, мелкой (Мгшр) 3,0 %. Песок имеет крупной фракции (Кпр) 1,0 %, средней (Спр) 90,2 %, мелкой (Мпр) 8,8 %.

Анализ представленных выше характеристик зерновых составов компонентов бетонной смеси позволяет сделать следующие предварительные выводы. Ни один из них не может обеспечить рациональный зерновой состав бетонной смеси. Поэтому необходимо использовать смесь нескольких из них.

Граншлак имеет 64,0 % зерен средней фракции (Сгшр), поэтому его долевое содержание (ГШд) в составе трехкомпонентной бетонной смеси, обеспечивающее необходимое количество средней фракции (23 %) составит:

$$\text{ГШд} = 23 / (\text{Сгшр} / 100) = 23 / 0,64 = 36,0.$$

Долевое содержание крупного компонента (Кгшд), которое будет внесено с граншлаком, можно определить, зная, что его процентное содержание в граншлаке составляет 33,0 %:

$$\text{Кгшд} = \text{ГШд} \times \text{Кгшр} = 36 \times 33,0 / 100 = 11,88,$$

принимаем 12,0.

Долевое содержание мелкого компонента (Мгшд), которое будет внесено с граншлаком также определяется по его процентному содержанию в граншлаке – 3,0 %:

$$\text{Мгшд} = \text{ГШд} \times \text{Мгшр} = 36 \times 3,0 / 100 = 1,0.$$

Недостающее количество крупной фракции необходимо обеспечить введением керамзита. Долевое содержание керамзита (Керд) в составе трехкомпонентной бетонной смеси, обеспечивающее необходимое количество крупной фракции (52 %) в бетонной смеси с учетом содержащейся доли крупной фракции в граншлаке 12,0 составит:

$$\text{Щд} = (52 - 12,0) / (\text{Ккерр} / 100) = 40,0 / 1,0 = 40,0$$

Таким образом, для обеспечения вышеприведенного рационального соотношения трехфракционной смеси крупного, среднего и мелкого компонентов 52:23:25 необходимо использовать 40,0 долей (%) керамзита, 36,0 долей (%) граншлака. Вместе с граншлаком будет внесено 1 доля (%) мелкозернистой составляющей, следовательно, необходимо в такой состав еще внести 24,0 долей (%) цемента либо цемента с наполнителем, например золой-уноса.

Содержание каждой составляющей (номинальный состав бетонной смеси) определим на начальном этапе из условия, что в кубометре бетонной смеси суммарная масса сухих компонентов составит 2250 кг. Уточненный состав сухих компонентов определим позже, рассчитав содержание граншлака и керамзита с учетом их реальной насыпной массы. Поскольку вышеприведенное долевое содержание керамзита (Кер), граншлака (ГШ), цемента и наполнителя (Ц+Н) с учетом их реального зернового состава равно:

$$\text{Кер:ГШ:(Ц+Н)} = 40,0 : 36,0 : 24,0,$$

то расход каждой составляющей легко рассчитать. Необходимо керамзита $\text{Кер} = 2250 \times 0,40 = 900$ кг. Но, учитывая, что насыпная масса используемого керамзитового гравия составляет 450 кг/м^3 , а гранитного щебня 1600 кг/м^3 , понижающий коэффициент на расход керамзита составит: $450 / 1600 = 0,28$, следовательно, керамзита необходимо: $900 \times 0,28 = 253$ кг. Потребное количество граншлака определим с учетом того, что его насыпная масса составляет 880 кг/м^3 , а щебня 1600 кг/м^3 , следовательно, необходимо ввести понижающий коэффициент на расход граншлака – он равен $880 / 1600 = 0,55$. $\text{ГШ} = 2250 \times 0,35 \times 0,55 = 464$ кг. Цемента и наполнителя необходимо $(\text{Ц+Н}) = 2250 \times 0,24 = 540$ кг.

Если необходимо получать бетоны различной прочности из вышеприведенных компонентов, то расход керамзита и граншлака надо оставлять неизменным, чтобы обеспечивать рациональный зерновой состав компонентов, следовательно, плотную упаковку зерен и наиболее эффективное использование цемента. Менять надо расход цемента, принимая не более 540 кг на кубометр бетонной смеси. Но при необходимости изменения прочности бетона, уменьшая расход цемента, надо недостающую часть мелкозернистого компонента компенсировать требуемым количеством золы-уноса или другого наполнителя. Суммарный их расход должен составлять 540 кг на кубометр бетонной смеси.

Дальнейшее определение составов бетонов необходимо проводить экспериментально-расчетным методом в зависимости от требуемой удобоукладываемости бетонной смеси, прочности и других физико-механических характеристик затвердевшего бетона, качества используемого цемента, химических добавок и некоторых других конкретных условий. Но расход керамзита и граншлака надо оставлять неизменным, чтобы не нарушать рациональный зерновой состав компонентов, а, следовательно, обеспечивать эффективное использование цемента.

Таким образом, в номинальном составе расход компонентов легкого бетона с использованием в качестве легких заполнителей керамзитового гравия и граншлака при условии обеспечения рационального зернового состава компонентов необходимо принимать: керамзитового гравия 253 кг, граншлака 464 кг, цемента и наполнителя из золы-уноса или другого мелкодисперсного материала 540 кг. Расход воды, а

также пластификатора определяется с учетом требуемой удобоукладываемости. В зависимости от требуемой прочности необходимо также уточнять и расход цемента, но в пределах указанного суммарного расхода мелкозернистого компонента.

Исходя из вышеприведенных предпосылок, нами определены расходы компонентов в пробных составах бетонной смеси, проверена их удобоукладываемость и прочность затвердевшего бетона в 28-суточном возрасте нормального твердения. Визуальными наблюдениями за процессом укладки и уплотнения этих составов установлено, что даже при значительном расходе воды и рекомендуемого расхода суперпластификатора не удается получить смесь хорошей связности и удобоукладываемости. Анализом зернового состава компонентов бетонной смеси принятого состава установлены причины этого явления. В этих составах из 52 частей крупного компонента 12 частей представлены шлаком со средним размером зерен около 3 мм и остальные 40 частей керамзитом со средним размером зерен около 10...12 мм. Следовательно, если для крупной фракции, представленной керамзитом, имеются соответствующие зерна средней фракции в граншлаке с размером зерен примерно в десять раз меньше, то для отнесенных к крупной фракции зерен со средним размером около 3 мм в составе граншлака зерен с размером в десять раз меньше, которые прошли через сито 0,315 (см. табл. 1) очень мало. Недостаток этой промежуточной фракции не позволяет получить смесь с хорошей связностью, однородностью и удобоукладываемостью. Поэтому принято решение в составы ввести днепровский песок, который представлен преимущественно фракциями 0,315 и меньше.

В результате такой корректировки получены составы с расходом керамзита 200 кг, граншлака 450 кг, песка 300 кг. Суммарный расход цемента и золы-уноса Приднепровской ГРЭС принят постоянным и равным 550 кг. Эти составы при расходе воды 200 литров на кубометр и комплексной добавки ПЛКП в количестве 1 % от массы цемента обеспечили прочность при расходе цемента 150 кг – 5,3 МПа, 250 кг – 10,8 МПа, 350 кг – 15,8 МПа. Для поддержки на постоянном уровне количества мелкозернистого компонента, а соответственно и рационального зернового состава компонентов в целом, в составы вводилась зола-уноса Приднепровской ГРЭС при расходе цемента 150 кг – 400 кг, 250 кг – 300 кг, 350 кг – 200 кг. Коэф-

фициент эффективности использования цемента, выраженный отношением достигнутой прочности к расходу цемента, при обеспечении вышеприведенного рационального состава компонентов составил при расходе цемента 150 кг – 0,035, 250 кг – 0,043, 350 кг – 0,045. Снижение коэффициента эффективности использования цемента в бетонах с пониженным расходом цемента при рациональном зерновом составе компонентов можно объяснить низким качеством золы-уноса, в частности наличием значительного количества несгоревших частиц.

Исходя из вышеприведенных предпосылок обеспечения рационального зернового состава компонентов, нами получены также составы легких бетонов без керамзитового гравия. При этом расход граншлака увеличен до 650 кг на кубометр бетонной смеси, а песка до 400 кг. Суммарный расход мелкозернистого компонента, состоящего из цемента и золы-уноса Приднепровской ГРЭС, оставался, как и в предыдущем эксперименте, постоянным и равным 550 кг. Так же как и в предыдущем эксперименте при изменении расхода цемента изменялся расход золы-уноса Приднепровской ГРЭС. Расход воды и комплексной добавки ПЛКП принят так же как и в предыдущем эксперименте с керамзитом.

Несмотря на то, что средняя плотность бетона без керамзитового гравия увеличилась до 1850 кг/м³, а плотность бетона с керамзитовым гравием составляла 1650 кг/м³, его прочность уменьшилась. При таком же расходе воды и комплексной добавки ПЛКП, а, следовательно, и удобоукладываемости бетонной смеси, прочность бетона без керамзитового гравия составила при расходе цемента 150 кг – 2,6 МПа, 250 кг – 8,4 МПа, 350 кг – 12,7 МПа.

Анализ представленных результатов

Испытания контрольных образцов бетона с местными вторичными продуктами промышленности позволяет определить следующие закономерности.

Разработанная ранее методика проектирования составов бетонов из условия обеспечения рационального зернового состава компонентов, обеспечивающего наиболее плотную упаковку зерен применяемых исходных материалов, может успешно применяться и для проектирования составов с использованием местных вторичных продуктов промышленности, в том числе легких заполнителей. При использовании в составах бетонов материалов с различной насыпной массой и плотностью зерен необходимо

использовать соответствующий коэффициент, учитывающий соотношение насыпных масс применяемых материалов для получаемого легкого бетона. Приготовленные бетонные смеси, состав которых рассчитан по предложенной методике, отличаются хорошей связностью, нерасслаиваемостью, удобоукладываемостью. При варьировании расхода цемента в широком диапазоне эти характеристики бетонной смеси остаются практически неизменными, чего трудно добиться при других подходах к проектированию составов бетонов с весьма неоднородными по плотности и насыпной массе исходными компонентами.

Применение комплексной добавки ПЛКП в бетонных смесях, в которых утилизируется значительное количество местных вторичных продуктов промышленности, оправдано. Даже при низких расходах цемента, а, следовательно, низкопрочных бетонах, пластифицирующая добавка обеспечивает улучшенную удобоукладываемость легких бетонов. Этот эффект обеспечивается только потому, что составы имеют рациональный зерновой состав компонентов при любом расходе цемента. Таким образом, подтверждена возможность применения пластифицирующих добавок в легких бетонах, в том числе низкопрочных, при условии обеспечения рационального зернового состава компонентов бетонной смеси.

Полученную низкую прочность бетонов и низкий коэффициент эффективности использования цемента можно объяснить низкой активностью применяемого цемента, а также низким качеством применяемых местных вторичных продуктов промышленности. Зола-уноса Приднепровской ГРЭС отличается от других аналогичных продуктов, например золы-уноса Ляджинской ГРЭС, наличием значительного количества (до 20 %) несгоревших частиц. Последние представляют собой частички кокса с очень развитой поверхностью. Следовательно, существенно повышается водопотребность смеси и, как следствие, снижается прочность. Очень развита поверхность также и у граншлака.

Полученный легкий бетон, как с керамзитовым гравием, так и без него с использованием в качестве легкого заполнителя граншлака может

применяться для устройства отдельных элементов конструкции пола.

Выводы

1. При утилизации в бетонах местных вторичных продуктов промышленности целесообразно определять расход компонентов, обеспечивая рациональный зерновой состав компонентов.

2. Необходимо проведение дальнейших исследований по оптимизации составов и свойств бетонов с использованием местных вторичных продуктов промышленности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.03.13-88 Полы [Текст]. – Взамен СНиП II-V.8-71; введ. 01.01.89. – М.: Госстрой СССР, 1989. – 15 с.
2. Формирование структуры композиционных материалов и их свойства [Текст] / Б. В. Гусев и др. – М.: Научный мир, 2006. – 560 с.
3. Иванов, И. А. Легкие бетоны с применением зол электростанций [Текст] / И. А. Иванов. – М.: Стройиздат, 1986. – 136 с.
4. Сергеев, А. М. Использование в строительстве отходов энергетической промышленности [Текст] / А. М. Сергеев. – К.: Будівельник, 1984. – 120 с.
5. Нисневич, М. Утилизация попутных продуктов горения угля в промышленности строительных материалов [Электрон. ресурс] / М. Нисневич, Г. Сиротин // Строительные материалы. – 2003. – № 9. – С. 39-41. – Режим доступа: <http://www.first-realty.com.ua/art/4/147.html>.
6. Нетеса, Н. И. Проблемы экономии цемента в бетонах введением рационального количества микрозаполнителей [Текст] / Н. И. Нетеса // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. / ПГАСА. – Вып. 12. – Д.: ПГАСА, 2001. – С. 301-305.
7. Нетеса, Н. И. Эффективные составы бетонов для плит пустотного настила непрерывного формования [Текст] / Н. И. Нетеса // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006. – Вип. 10. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2006. – С. 110-112.
8. Нетеса, Н. И. Научные основы повышения эффективности использования цемента в бетонах [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Н. И. Нетеса. – Д., 2004. – 372 с.

Поступила в редколлегию 18.03.2010.

Принята к печати 25.03.2010.