

УДК 691.5:666.971

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ШЛАКОБЕТОНА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ БЕЗОПАЛУБОЧНОГО ФОРМОВАНИЯ

Завьялова Д.В.

ФГБОУ ВО «Череповецкий государственный университет», Череповец, e-mail: darevnaz@mail.ru

Настоящая статья посвящена исследованию рационального состава мелкозернистого шлакобетона для производства железобетонных изделий методом безопалубочного формования. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по применению отсева шлакового щебня в качестве минеральной тонкомолотой добавки и заполнителя в мелкозернистых конструктивных шлакобетонах. Установлен рациональный состав тонкомолотой добавки при совместном помоле гранулированного доменного шлака и отсева шлакового щебня. Рациональные пределы доли добавки в вяжущем составляют 0,4–0,5. При вводе шлаковой добавки наблюдается повышение активности вяжущего на 15–20%; теплопроводность вяжущего с увеличением доли добавки монотонно уменьшается. Подбор рационального состава мелкозернистого шлакобетона проводился с привлечением математического метода планирования эксперимента. По результатам эксперимента рассчитаны уравнения регрессии, выражающие зависимость прочности, плотности и теплопроводности мелкозернистого шлакобетона, и построены графики, отображающие полученные зависимости. Приведены составы мелкозернистых шлакобетонов, рекомендованные для производства железобетонных изделий методом безопалубочного формования. Согласно результатам испытаний, удельный расход цемента на единицу прочности в рекомендуемых составах мелкозернистого шлакобетона составляет на 40–45% меньше, чем в традиционных бетонах без тонкомолотой полифракционной шлаковой добавки. Практическая реализация результатов представленных исследований позволит организовать рациональное использование отсева шлакового щебня при производстве высокоэффективных минеральных тонкомолотых шлаковых добавок и конструктивных мелкозернистых шлакобетонов с относительно низкой теплопроводностью и удельным расходом цемента.

Ключевые слова: отсев шлакового щебня, тонкомолотая добавка, мелкозернистый шлакобетон, прочность, теплопроводность, ресурсоэффективность

STUDY OF THE RATIONAL COMPOSITION OF FINE-GRAINED SLAG CONCRETE FOR THE PRODUCTION OF PRODUCTS BY THE METHOD OF FORMWORK MOLDING

Zavyalova D.V.

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Cherepovets State University, Cherepovets, e-mail: darevnaz@mail.ru

The results of experimental studies on the application of residue of slag crushed stone as a mineral fine-ground additive and aggregate in fine-grained structural slag concretes are presented in the article. The rational composition of a fine-ground additive in a joint grinding of granulated blast furnace slag and residue of slag crushed stone is established. The rational limits of the additive in the binder are 0.4-0.5. When you enter the slag additive, there is an increase in the activity of the binder by 15-20%; thermal conductivity of the binder with an increase in the proportion of the additive monotonically decreases. Selection of the rational composition of fine-grained slag concrete was carried out with the involvement of the mathematical method of experiment planning. The regression equations expressing the dependence of strength, density and thermal conductivity of fine-grained slag concrete based on the results of the experiment are calculated and graphs showing the obtained dependencies are constructed. Compositions of fine-grained slag concretes recommended for the production of reinforced concrete products by the method of formwork molding are presented. According to the test results, the specific consumption of cement per unit of strength in the recommended compositions of fine-grained slag concrete is 40-45% less than in traditional concrete without fine-grinding slag additives. The practical realization of the results of the presented research will allow to organize the rational use of residue of slag crushed stone in the production of high-performance mineral fine-ground slag additives and structural fine-grained slag concrete with a relatively low thermal conductivity and specific consumption of cement.

Keywords: residue of slag crushed stone, fine-ground additive, fine-grained slag concrete, strength, thermal conductivity, resource efficiency

В настоящее время в России всё больше предприятий по производству сборного железобетона начали переходить на безопалубочную технологию непрерывного формования преднапряжённых железобетонных конструкций и изделий на длинномерных стендах. Достоинство данной технологии заключается в отказе от применения дорогостоящих оборотных стальных форм, уменьшении удельных расходов цемента и металла, исключении пропарки изделий.

Всё это позволяет снизить себестоимость продукции [1].

Перспективным направлением при использовании данной технологии является замена традиционных тяжёлых бетонов на мелкозернистые бетоны различного состава. В качестве мелкого заполнителя в таких бетонах могут применяться мелкофракционные отходы различных производств, в том числе и шлаки металлургической промышленности.

Таблица 1

Фракционный состав и основные характеристики отсева шлакового щебня

Остаток	Остатки на ситах, % по массе					Проход через сито с сеткой № 0,16, % по массе	Модуль крупности	Насыпная плотность, кг/м ³
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16			
Частный	20,18	13,58	20,64	20,93	14,45	9,08	2,73	1100–1300
Полный	20,18	33,76	54,40	75,33	89,78	98,86		

Таблица 2

Характеристики минеральных добавок

Показатели	Тонкомолотая минеральная добавка	
	Отсев шлакового щебня	Гранулированный доменный шлак
Удельная поверхность, м ² /кг	300–400	300–400
Модуль основности	0,965	0,99
Модуль активности	0,32	0,33
Силикатный модуль	2,94	2,97

Актуальным вопросом, требующим дополнительных исследований, является применение в мелкозернистых бетонах отсева (фр. < 5 мм) шлакового щебня, который пока не нашёл широкого использования в строительной практике [2–4].

На Череповецком металлургическом комбинате накоплен значительный объём данного отсева, получаемого в процессе производства шлакового щебня и разделения его на фракции (5–20, 20–40, 40–70 и более). Примерный выход отсева составляет 0,2–0,3 м³ на 1 м³ щебня. Использование отсева крайне ограничено из-за отсутствия сертификатов и технологических регламентов.

Цель исследования – создание ресурсоэффективного мелкозернистого шлакобетона на отсева шлакового щебня, обладающего универсальными теплозащитными и прочностными эксплуатационными характеристиками. Данный вид бетона предназначен для производства железобетонных изделий методом безопалубочного формования.

На первом этапе была сделана оценка фракционного состава и физико-химических характеристик в сравнении с традиционно выпускаемым шлаковым щебнем и гранулированным доменным шлаком (табл. 1, 2). Оценка показала, что данный материал соответствует требованиям ГОСТ 31424-2010 «Материалы строительные нерудные из отсева дробления плотных горных пород при производстве щебня. Технические условия» и может быть рекомендован для применения в бетонах.

Для выработки рекомендаций по использованию отсева в бетонах было выбрано два направления:

1) в качестве минеральной тонкомолотой добавки как активного компонента по замене части вяжущего;

2) в качестве заполнителя для мелкозернистых конструкционных бетонов. При этом учитывался известный факт [2] – шлакооседающие вяжущие обладают меньшим коэффициентом теплопроводности, чем другие виды цементов.

Исследование минеральной тонкомолотой добавки из отсева шлакового щебня

Оценка качества минеральной тонкомолотой добавки проводилась методом сравнения с добавкой, получаемой при помоле гранулированного доменного шлака. Экспериментальный анализ показал, что при помоле гранулированного шлака и отсева шлакового щебня до одинаковой удельной поверхности в лабораторной шаровой мельнице, время помола последнего на 35–40% меньше (рис. 1), а следовательно, и меньше удельные энергетические затраты, которые ещё больше увеличиваются за счёт предварительной сушки гранулированного шлака.

Активность полученных шлаковых добавок проверялась на образцах цементно-шлакового вяжущего по ГОСТ 30744-2001 «Методы испытаний с использованием полифракционного песка». Использовался ЦЕМ I 42,5Н производства ПАО «Мордовцемент». Относительные показатели прочности и теплопроводности смешанных вяжущих (28 суток твердения в нормальных условиях) приведены на рис. 2. Установлено, что влияние шлаковых добавок на показатели активности и теплопроводность шлакоцементных вяжущих практически идентичны. При расходе добавок 35–40% в общем объёме вяжущего наблюдается повышение активности на 15–20%; теплопроводность вяжущего с увеличением доли добавки монотонно уменьшается. Аппрок-

симация полученных результатов выражается зависимостями (1, 2), отражающими тенденцию влияния шлаковых добавок на указанные свойства.

$$R_v = R_{ц} [1 + 1,5Д(1 - 1,7Д)], \quad (1)$$

$$\lambda_v = \lambda_{ц} (1 - 0,45Д). \quad (2)$$

Известно [5], что активность минеральных добавок на основе доменных шлаков связана с их минеральным и фазовым составами. Наибольшей активностью обладают шлаковые добавки, содержащие 35–45 % кристаллической фазы. Учитывая, что гранулированный шлак имеет 90–95 % стеклофазы, было предложено формировать двухкомпонентную шихту для получения минеральной добавки, содержащей 60–70 % гранулированного шлака и 30–40 % отсева шлакового щебня, содержащего более 70 % кристаллической фазы (рис. 3). Данная рецептура шихты была рекомендована для промышленного изготовления добавки на мельницах типа роторно-вихревая и шаровая.

Механоактивация данной шихты создала условия формирования усредненного фазового состава, соответствующего требованиям повышенной активности и получения шлаковой добавки, содержащей в своём составе при заданной тонкости помола 350–400 м²/кг, порядка 20 % более грубых дисперсных частиц удельной поверхностью 250–300 м²/кг (остаток на сите 008), представляющих в основном граншлаковый компонент. В ходе исследования данной добавки были установлены рациональные пределы доли добавки в вяжущем, равные 0,4–0,5, при которых относительная активность шлакоцемент-

ного вяжущего увеличивалась на 15–20 %, относительная теплопроводность уменьшалась на 25–35 % в сравнении с исходным клинкерным вяжущим. Полученные результаты в определенной степени связаны с положительным влиянием дисперсности добавки. Наличие более грубых частиц способствовало повышению прочности вяжущего композита по принципу формирования структуры микробетона [6] и снижению теплопроводности затвердевшего вяжущего, связанного с содержанием в нём увеличенного количества стеклообразной составляющей.

Исследование мелкозернистого бетона на отсеве шлакового щебня

На этапе исследования бетонов рассматривался вариант мелкозернистого конструкционного шлакобетона для изготовления изделий методом безопалубочного формования, в котором в качестве заполнителя использовался отсев шлакового щебня, в качестве вяжущего – портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н ПАО «Мордовцемент» и полидисперсная тонкомолотая шлаковая добавка. Исследования проводились с привлечением математического метода планирования эксперимента. В качестве независимых переменных были выбраны: X_1 – доля полифракционной добавки в вяжущем; X_2 – доля молотого отсева шлакового щебня в полифракционной добавке. Уровни планирования эксперимента приведены в табл. 3. Расход комплексного вяжущего составлял 550 кг/м³, жёсткость бетонной смеси обеспечивалась в пределах 20–30 с. В качестве пластификатора использовалась добавка «Реламикс», расход 0,5 % от массы вяжущего.

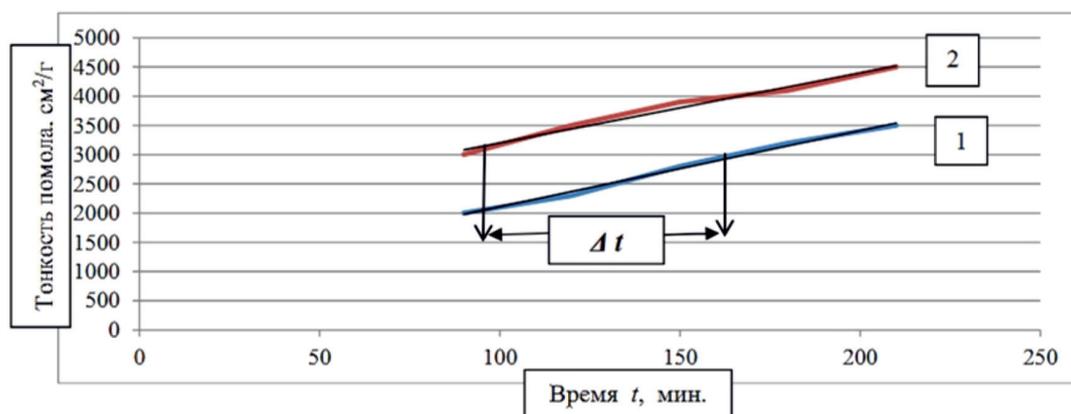


Рис. 1. Зависимость удельной поверхности компонентов шлаковой добавки от времени помола: 1 – гранулированный доменный шлак; 2 – отсев шлакового щебня

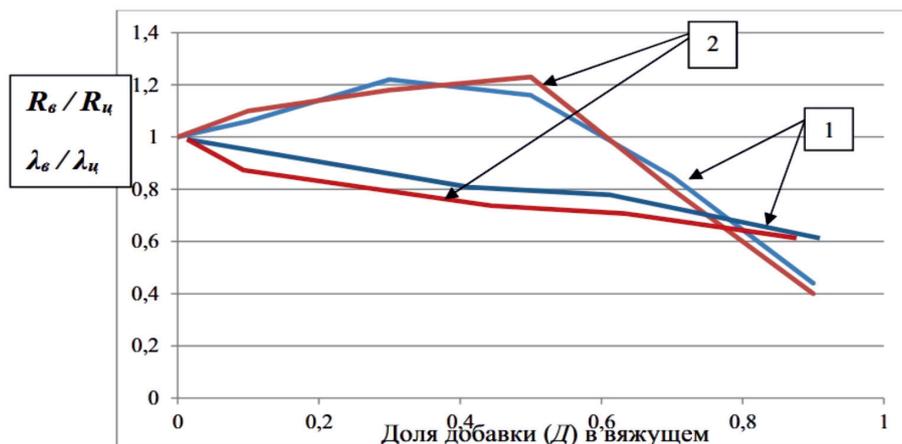


Рис. 2. Влияние доли шлаковой добавки на относительную активность и теплопроводность шлакоцементного вяжущего: 1 – гранулированный доменный шлак; 2 – отсев шлакового щебня

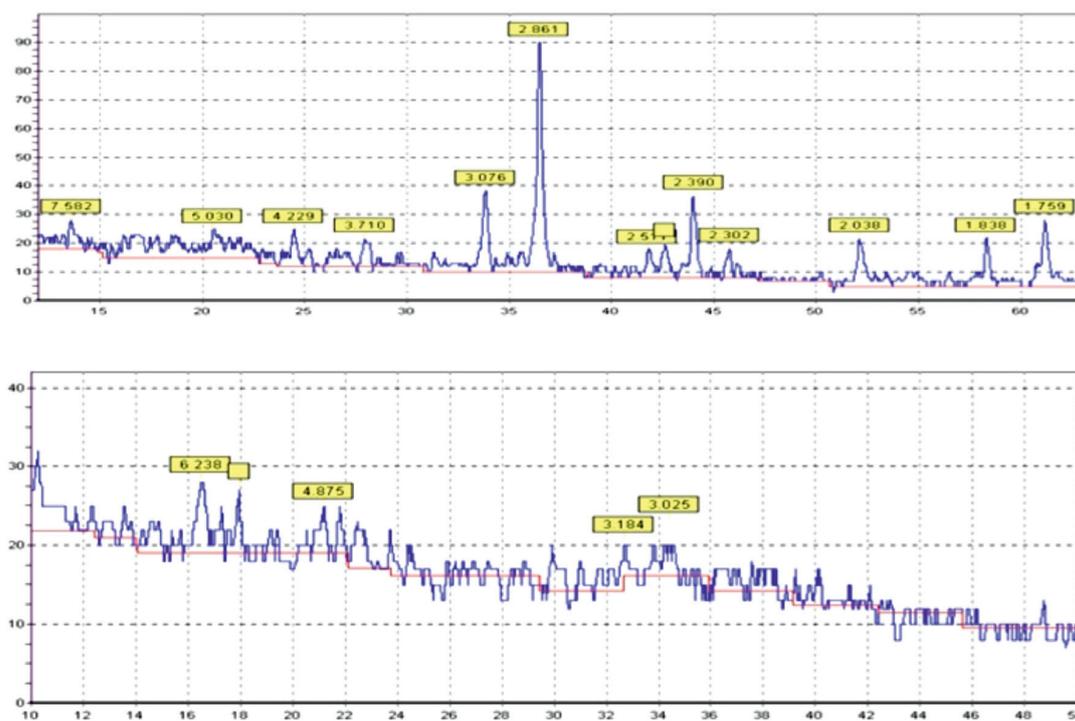


Рис. 3. Рентгенограммы образцов гранулированного шлака и отсева шлакового щебня производства ПАО «Северсталь»

Таблица 3

Значения интервалов варьирования факторов

Код	Значение кода	Значение факторов	
		X_1	X_2
Основной уровень	0	0,38	0,40
Интервал варьирования	ΔX_i	0,05	0,10
Верхний уровень	+	0,43	0,50
Нижний уровень	-	0,33	0,30

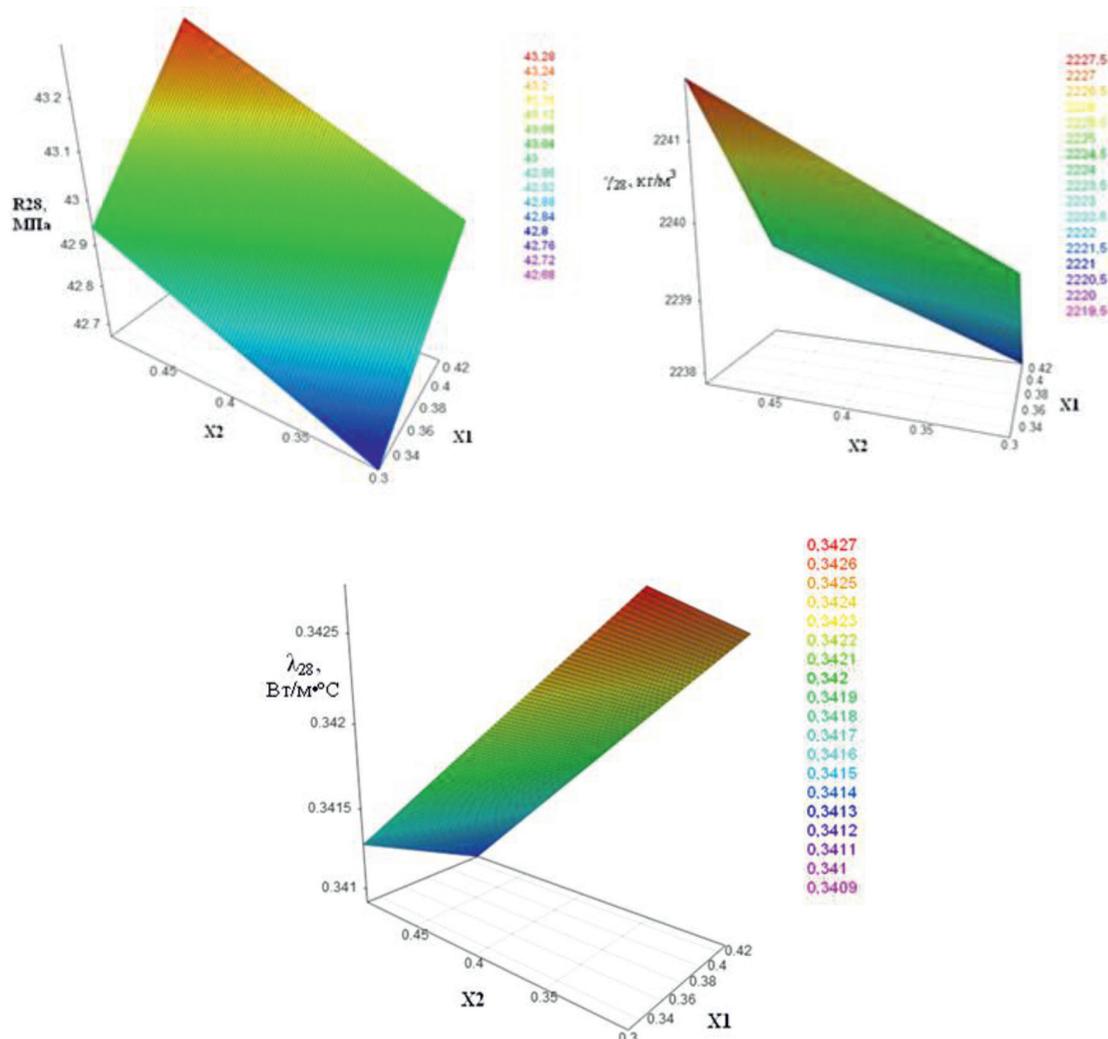


Рис. 4. Графики зависимости прочности, плотности и теплопроводности мелкозернистого шлакобетона от факторов X_1 и X_2

Таблица 4

Сравнительные результаты испытаний образцов мелкозернистых шлакобетонов

Состав бетона 1 м ³ смеси	γ_{28} , кг/м ³	R_{7} , МПа	R_{28} , МПа	R_{np} , МПа	$E_6 \cdot 10^3$, МПа	λ_{28} , Вт/м·°С	$K_{эф}$, кг/МПа
Цемент – 550 кг/м ³ Отсев – 1000 л/м ³ В/В = 0,33 Реламикс – 22,1 л/м ³	2250	34,5	43,1	41,2	28,9	0,435	12,76
Цемент – 300 кг/м ³ Добавка – 250 кг/м ³ Отсев – 1000 л/м ³ В/В = 0,34 Реламикс – 16,6 л/м ³	2230	33,4	43,3	40,2	26,8	0,343	6,93

По результатам эксперимента рассчитаны уравнения регрессии в виде полиномов первой степени, выражающих зависимость прочности, плотности и теплопроводности мелкозернистого шлакобетона от исходных

факторов после 28 суток нормального твердения, и построены графики, отображающие полученные зависимости (рис. 4).

$$R_{28} = 41,25 + 3,03 \cdot X_1 + 1,03 \cdot X_2 + 1,08 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (3)$$

$$\gamma_{28} = 2240 - 10 \cdot X_1 + 20 \cdot X_2 - 30 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (4)$$

$$\lambda_{28} = 0,345 - 0,005 \cdot X_2 - 0,0075 \cdot X_1 \cdot X_2. \quad (5)$$

Анализ данных уравнений позволил установить рациональные значения области исходных факторов, близких к оптимальным, и рекомендовать составы мелкозернистых шлакобетонов с использованием полифракционного комплексного шлакодержателя для производства изделий методом безопалубочного формования. Сравнительные результаты испытаний бетонов приведены в табл. 4.

Прогнозируемая экономия клинкерного вяжущего хорошо иллюстрируется через критерий эффективности $K_{эф}$, отражающий экономию цемента: $K_{эф} = Ц/R_b$, (Ц – расход цемента, кг/м³; R_b – прочность бетона, МПа). Согласно результатам испытаний, удельный расход цемента на единицу прочности в рекомендуемых составах мелкозернистого бетона составляет на 40–45% меньше, чем в традиционных бетонах без тонкомолотой полифракционной шлаковой добавки.

Заключение

Практическая реализация результатов представленных исследований по-

зволяет организовать рациональное использование отсева шлакового щебня при производстве высокоэффективных минеральных тонкомолотых шлаковых добавок и конструкционных мелкозернистых шлакобетонов с относительно низкой теплопроводностью и удельным расходом цемента.

Список литературы

1. Копша С.П., Заикин В.А. Технология безопалубочного формования – ключ к модернизации промышленности и себестоимости жилья // Технологии бетонов. – 2013. – № 11. – С. 29–33.
2. Грызлов В.С. Формирование структуры шлакобетонов. – Lambert Academic Publishing Saarbucken Deutschland, 2012. – Р. 347.
3. Грызлов В.С. Шлакобетоны в крупнопанельном домостроении // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 40–41.
4. Гатылюк А.Г., Грызлов В.С. Определение оптимального состава мелкозернистого шлакобетона на отходах металлургического производства // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – Т. 1. № 2 (47). – С. 9–11.
5. Горшков В.С., Александров С.Е., Ивашенко С.И., Горшкова И.В. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.
6. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. – СПб.: ООО «Строй-Бетон», 2006. – 692 с.