

УДК 666.97

*Дворкин Л.И., доктор технических наук, профессор,
Дворкин О.Л., доктор технических наук, профессор
Национальный университет водного хозяйства и
природопользования,
33028, г. Ровно, ул. Чорновола, 49, корпус №6, к. 610
тел. +38(0362)40-05-10, e-mail: l.i.dvorkin@nuwm.rv.ua*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЗОЛОШЛАКОБЕТОНОВ

В статье приводятся экспериментальные результаты, полученные при исследовании влияния добавок суперпластификатора и кремнефтористого активатора на прочность золошлакобетонов. Приводятся эмпирические зависимости для прогнозирования прочности и расчета составов мелкозернистых золошлакобетонов.

Ключевые слова: активатор, бетон, добавка, зола, отход, прочность, суперпластификатор, шлак

Одним из эффективных направлений утилизации золошлаковых отходов является изготовление мелкозернистых бетонов с использованием золы-уноса как активной минеральной добавки и золошлаковой смеси в качестве заполнителя. Свойства золошлакобетонов и, в частности, их прочность можно существенно улучшить, вводя суперпластификаторы и активаторы твердения. В качестве последних могут быть использованы фтористые соли и, в частности, кремнефторид натрия (Na_2SiF_6).

Прочность мелкозернистых золошлакобетонов определяли по ДСТУ Б В.2.7-187:2009 при сжатии и изгибе при нормальном твердении в возрасте 3, 7 и 28 сут.

Анализ экспериментальных данных, приведенных на рис.1, позволяет отметить, что общий характер зависимостей прочности на сжатие (R_o) от цементно-водного отношения (C/B) - $R_o = f(C/B)$ для золошлакобетонов приближается к линейному. Кинетика роста их прочности при нормальных температурах близка к кинетике роста прочности обычных мелкозернистых бетонов. Через 3 сут бетоны набирают 30...50%, через 7 сут - 60...80% 28-сут прочности. Для бетонов с комплексными добавками, в состав которых входят суперпластификатор С-3 и активатор Na_2SiF_6 , характерен более интенсивный рост прочности в 3^х и 7 сут возрасте. Их 28 сут прочность на 10...30% выше, чем прочность бетонов без добавок. При $C/B = \text{const}$ наблюдается небольшое увеличение прочности золошлакобетонов как с добавками, так и без них при переходе к более жестким смесей, что согласуется с известными данными [1].

Для мелкозернистых золошлакобетонов как и для песчаных бетонов характерно более высокое отношение прочности на растяжение при изгибе к прочности при сжатии, чем для обычных тяжелых бетонов, что объясняется их более высокой однородностью. Отношение $R_{из}/R_{сж}$ для исследованных золошлакобетонов находится в диапазоне 0,14...0,22. Полученные экспериментальные данные прочности золошлакобетонов можно аппроксимировать формулами общего вида:

$$R_o = A R_y (C/B - b), \quad (1)$$

где R_y - активность цемента, A - коэффициент, зависящий от качества исходных материалов.

Ранее формулы типа (1) для мелкозернистых бетонов были предложены различными исследователями [1-4]. Ю.М. Баженов для расчета прочности цементно-песчаного бетона предложил [2] формулу (2):

$$R_o = A R_y (C/B - 0,8). \quad (2)$$

Для высококачественных материалов $A=0,8$, для материалов среднего качества $A=0,75$, для цемента низких марок и мелкого песка $A=0,65$.

Дифференциация заполнителей мелкозернистых бетонов по уровню качества в формуле (2), однако, является недостаточно конкретизированной.

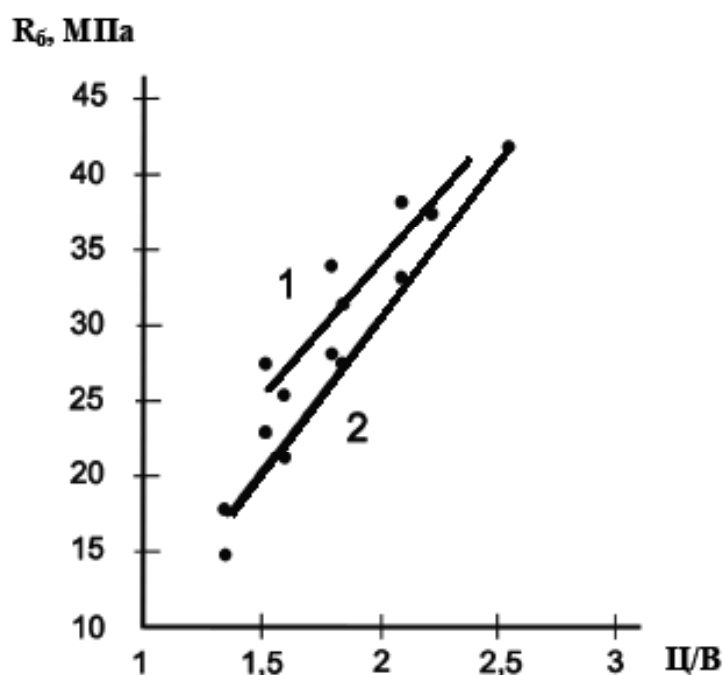


Рисунок 1. Изменение прочности золошлакобетонов в зависимости от Ц/В:
1 - с добавкою 1% C-3+Na₂SiF₆ от массы вяжущего; 2 - без добавки

Формула (2) не учитывает удобоукладываемость смесей, вид заполнителя, цемента, введенных добавок и др.. Она действительна при коэффициенте уплотнения бетонной смеси более 97%. На каждый процент недоуплотнения рекомендуется снижать прочность при $C/B=const$ на 5%.

Нами предложено [1] дифференцировать значения коэффициентов А и b в зависимости от вида мелкозернистых бетонных смесей по удобоукладываемости. При использовании заполнителей обычного качества формула (1) принимает вид:

- для пластичных смесей

$$R_c = 0,48 R_y (C/B - 0,65), \quad (3a)$$

- для жестких смесей

$$R_c = 0,48 R_y (C/B - 0,55). \quad (3б)$$

Более развернутая система уточненных значений коэффициентов предложена в НИИЖБ В.П.Сизовым [4]. Им рекомендованы [4] значения коэффициента А в зависимости от содержания в песке пыли, ила и глины, а также графики для его уточнения в зависимости от подвижности и жесткости бетонной смеси, модуля крупности песка, нормальной густоты цементного теста и цементно-водного отношения. Кроме того, введены в формулу (1) коэффициенты K_1 и K_2 . Первый применяют для пропаренного бетона. Он учитывает минералогический состав цемента. Второй учитывает уровень производства бетона в зависимости от коэффициента вариации прочности. Формула прочности при использовании указанных коэффициентов принимает вид:

$$R_c = A K_1 K_2 R_y (C/B - b). \quad (4)$$

Однако систему уточненных коэффициентов для песчаного бетона [4] трудно в полной мере использовать для прогнозирования прочности мелкозернистых золошлакобетонов тем более с комплексными добавками.

В табл. 1 приведены расчетные значения прочности золошлакобетонов по проанализированным выше формулам и относительная погрешность ее прогнозирования. Величину относительной погрешности ΔR_c находили по формуле:

ΔR_σ = |(R_σ^p - R_σ^φ) / R_σ^φ| · 100%, (5)

где R_σ^p, R_σ^φ - соответственно расчетные и фактические значения прочности бетона в МПа.

Наиболее высокая точность прогноза обеспечивается при расчетах прочности по формулам, полученных при обработке экспериментальных данных (рис.1):

- без добавки

R_σ = 0,5R_ц (Ц / В - 0,5), (6a)

- с добавкой 1% С-3 + 1% Na₂SiF₆

R_σ = 0,44R_ц (Ц / В - 0,1). (6б)

Наряду с базовыми эмпирическими значениями коэффициентов в указанных формулах можно учитывать дополнительные коэффициенты, отражающие влияние удобоукладываемости бетонной смеси, различных пластифицирующих и активирующих добавок.

Таблица 1

Расчетные значения прочности золошлакобетонов

№	Ц/В	Расчетные значения прочности (R_{σ}^p), МПа и относительные ошибки ΔR_{σ} , %							
		$R_{\sigma 1}^p$, ф-ла (2)	$\Delta R_{\sigma 1}^p$, %	$R_{\sigma 2}^p$, ф-ла (3)	$\Delta R_{\sigma 2}^p$, %	$R_{\sigma 3}^p$, ф-ла (4)	$\Delta R_{\sigma 3}^p$, %	$R_{\sigma 4}^p$, ф-ла (6)	$\Delta R_{\sigma 4}^p$, %
$OK=1...4\text{ см}, R_u=42,3\text{ МПа}$									
1	1.35	15,1	15,0	14,2	20,2	15,7	11,7	18,0	1,0
2	1.52*	19,8	25,3	17,7	33,3	18,9	28,8	26,4	0,3
3	1.6	22,0	13,7	19,3	24,4	20,3	20,3	23,3	8,8
4	1.8*	27,5	15,1	23,3	27,9	24,0	25,8	31,6	2,3
5	1,85	28,9	8,1	24,4	22,4	25,0	20,5	28,6	9,1
6	2.10*	35,7	4,7	29,4	21,5	29,6	21,1	37,2	0,7
7	2.22	39,0	4,4	31,9	14,8	31,8	15,0	36,4	2,7
8	2.56*	48,4	17,7	38,8	5,6	38,1	7,3	45,8	11,4
$\mathcal{K}=22...20\text{ с}, R_u=42,3\text{ МПа}$									
9	1.35	15,1	20,8	16,2	15,0	15,7	17,7	18,0	5,9
10	1.52*	19,8	30,5	19,7	30,9	18,9	33,8	26,4	7,3
11	1.6	22,0	17,0	21,3	19,6	20,3	23,3	23,3	12,2
12	1.8*	27,5	22,5	25,4	28,5	24,0	32,3	31,6	10,9
13	1.85	28,9	13,8	26,4	21,2	25,0	25,5	28,6	14,8
14	2.10*	35,7	8,1	31,5	19,1	29,6	24,0	37,2	4,3
15	2.22	39,0	2,2	33,9	11,2	31,8	16,8	36,4	4,8
16	2.56*	48,4	14,1	40,8	3,7	38,1	10,2	45,8	8,0

Примечания: 1. * Вводится комплексная добавка С-3 + Na₂SiF₆. 2. В формуле (2) коэффициент А принят 0,65. 3. В формуле (4) А = 0,5, K₁ = 0,92; K₂ = 0,95, b = 0,5.

Зависимости для прочности (R_σ) и отношения расхода цемента (Ц) к золошлаковому заполнителю (ЗШ) по массе от Ц/В при заданной удобоукладываемости с учетом уравнения абсолютных объемов позволяют для золошлакобетонов в соответствии с общим алгоритмом

для мелкозернистых бетонов рассчитывать составы бетонных смесей. Абсолютный объем золошлакобетонной смеси (при объеме воздуха $V_{ex} \rightarrow 0$) равен:

$$\frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{ЗШ}{\rho_{зш}} + \frac{В}{\rho_в} = 1000, \quad (7)$$

где $Ц$, $ЗШ$, $В$ - расходы вяжущего (в общем случае это может быть цемент с добавкой золы-уноса), золошлакового заполнителя и воды в кг/м³, $\rho_ц$, $\rho_{зш}$, $\rho_в$ - плотности указанных компонентов в кг/м³.

Схема расчета составов бетонной смеси может быть представлена в следующем виде:

1. Из уравнения прочности (5) находится цементно-водное отношение $Ц/В$.
2. По графикам, полученным на основе экспериментальных данных (рис.2), находят массовое отношение между вяжущим и золошлаковым заполнителем ($n=Ц/ЗШ$), обеспечивающее заданную удобоукладываемость бетонной смеси при найденном выше $Ц/В$ с учетом необходимой поправки на водопотребность заполнителя.

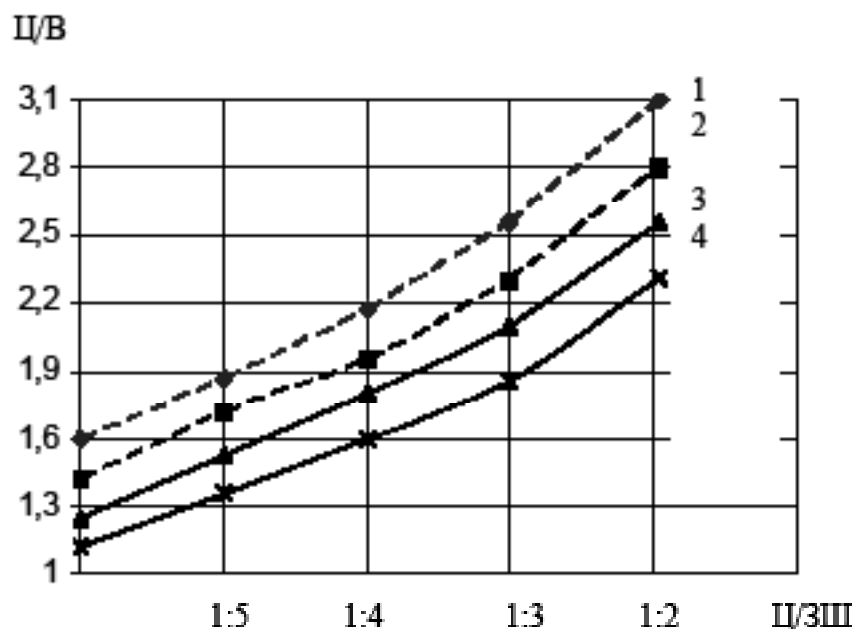


Рисунок 2. Зависимость $Ц/В$ – $Ц/ЗШ$ для смесей различной удобоукладываемости

1 – смесь с комплексной добавкой С-3 + Na_2SiF_6 с $Ж=11...20$ с; 2 – смесь без добавок с $Ж=11...20$ с; 3 – смесь с комплексной добавкой С-3 + Na_2SiF_6 с $ОК=1...4$ см; 4 – суміш без добавок $ОК=1...4$ см

3. Расход цемента находят из условия абсолютных объемов:

$$Ц = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_ц} + \frac{В}{Ц} + \frac{1/n}{\rho_{зш}}} \quad (8)$$

4. Расход воды и золошлакового заполнителя находят по формулам:

$$В = Ц \cdot В/Ц, \quad (9)$$

$$ЗШ = \frac{1}{n / Ц} \quad (10)$$

В табл.2 приведены расчетные составы золошлакобетонов марок М200 (В15), М250 (В20) и М300 (В25) при $OK = 1...4$ см, $R_u = 40$ МПа.

Корректировка водосодержания бетонной смеси при введении в ее состав золы-унос возможна при определении показателя B_d :

$$B_d = (B_z - K_{н.г}) Z_y, \tag{11}$$

где B_z - водопотребность (нормальная густота) золы-унос; $K_{н.г}$ - нормальная густота цементного теста; Z_y - содержание золы-унос, кг/м³.

Окончательный состав бетона находят после проведения пробных замесов с определением фактической плотности бетона. Расчетные расходы материалов умножают на коэффициент: $K = r_f / r_p$, где r_f и r_p - соответственно фактическая и расчетная плотность бетона.

Дополнительные возможности для расширения диапазона технологических задач открывает метод «приведенного Ц/В» [1], позволяющий учесть влияние золы-унос, вводимой непосредственно в бетонную смесь, а также вовлеченного воздуха:

$$\left(\frac{Ц}{В} \right)_{пр} = \frac{Ц + K_{ц.э} Z_y}{B + V_{вх}}, \tag{12}$$

где $K_{ц.э}$ - коэффициент т.н. «цементирующей эффективности» золы-унос, численно равный расходу цемента в кг, замещенных 1 кг золы; Z_y - расход золы-унос в кг/м³; $V_{вх}$ - объем вовлеченного воздуха в л/м³.

Таблица 2

Расчетные составы золошлакобетонов ($R_u = 42,3$ МПа)

№	Марка бетона (класс)	Бетон без добавок			Бетон з добавками С-3+ Na ₂ SiF ₆		
		Расход материалов, кг/м ³			Расход материалов, кг/м ³		
		вяжущее	золошлаковая смесь	вода	вяжущее	золошлаковая смесь	вода
Удобоукладываемость бетонной смеси ОК= 1...4 см							
1	M200 (B15)	368	1694	254	279	1813	238
2	M250 (B20)	437	1617	260	344	1755	239
3	M300 (B25)	512	1535	266	400	1720	234
Удобоукладываемость бетонной смеси Ж=11...20 с							
4	M200 (B15)	313	1845	216	248	1911	212
5	M250 (B20)	361	1805	215	292	1898	203
6	M300 (B25)	417	1751	217	335	1878	196

Коэффициент «цементирующей эффективности» золы-унос легко определить по экспериментальным данным:

$$K_{ц.э} = \frac{Ц_1 - Ц_2}{Z_y}, \tag{13}$$

где $Ц_1$ и $Ц_2$ - соответственно расходы цемента в бетонах с одинаковой прочностью без и с добавкой золы; Z_y - расход золы, кг/м³.

Значения $K_{ц.э}$ для золы Бурштынской ТЭС по экспериментальным данным [1] приведены ниже.

Класс бетона	Бетон пропаренный	Бетон нормального твердения при марке цемента	
		M500	M400
B12	0,5	0,38	0,31
B15	0,4	0,28	0,21
B20	0,37	0,25	0,18
B25	0,25	0,16	0,10

По данным В.П.Сизова [4] для мелкозернистых бетонов объем вовлеченного воздуха ($V_{вх}$) зависит от жесткости бетонных смесей и ориентировочно при расчетах может быть принят для смесей с жесткостью до 3 с - 10 л., 7 с - 40 л., 10 с - 60 л., 20 с - 80 л.

Ю.М. Баженов рекомендует [2] в ориентировочных расчетах принимать для подвижных смесей на среднем и крупном песках $V_{вх} = 20$ л, на мелком песке - 30 л, жесткой смеси - соответственно 50 и 70 л.

Формула, связывающая прочность мелкозернистого золошлакобетона с приведенным Ц/В, принимает вид [1]:

$$R_b = pA \cdot R_{ц} \left[\left(\frac{Ц}{В} \right)_{нр} - b' \right] \quad (14)$$

где pA - мультипликативный коэффициент, учитывающий качество исходных материалов, удобоукладываемость смеси, вид и концентрацию добавок и др.

Переход от приведенного к фактическому Ц/В можно осуществить по формуле:

$$\frac{Ц}{В} = \left(\frac{Ц}{В} \right)_{нр} - \frac{K_{цз} \cdot Z_y}{B + V_{вх}} \quad (15)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. С-Петербург: ООО «Стройбетон», 2006 – 692 с.
2. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.»Высшая школа». 1987 – 425 с.
3. Руководство по подбору составов бетона НИИЖБ, М.: Стройиздат, 1979,- 103 с.
4. Сизов В.П. Проектирование составов тяжелого бетона, - М.: Стройиздат, 1980.-144 с.

ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ МОДИФІКОВАНИХ ЗОЛОШЛАКОБЕТОНОВ

© Дворкін Л.І., Дворкін О.Л.

У статті наводяться експериментальні результати, отримані при дослідженні впливу добавок суперпластифікатора і кремнефтористого активатора на міцність золошлакобетонів. Наводяться емпіричні залежності для прогнозування міцності і розрахунку складів дрібнозернистих золошлакобетонів.

Ключові слова: активатор, бетон, добавка, зола, відход, міцність, суперпластифікатор, шлак

DESIGNING COMPOSITION OF MODIFIED ASH-SLAG CONCRETE

© Dvorkin L.I., Dvorkin O.L.

Experimental results obtained at the research of the effect of additions of superplasticizer and silicofluoride activator on ash-slag concrete strength are provided in the article. The empirical dependencies for predicting the strength and compositions of fine-grained ash-slag concrete calculation are given.

Keywords: activator, concrete, additive, ash, waste, strength, super-plasticizer, slag.