

Влияние доменного гранулированного шлака на свойства мелкозернистого самоуплотняющегося бетона

М.О. Коровкин, А.А. Короткова, Н.А. Ерошкина, С.М. Саденко

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Аннотация: Приведены результаты исследования влияния шлаков различных производителей на растекаемость, прочность и усадку самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов. Установлено, что замещение до 30 % цемента шлаком снижает прочность бетона только в начальные сроки твердения. Показано, что применение шлака позволяет значительно снизить усадку бетона.

Ключевые слова: доменный гранулированный шлак, минеральная добавка, мелкозернистый бетон, самоуплотняющийся бетон, расплыв смеси, прочность, усадка.

В самоуплотняющихся мелкозернистых бетонах ограниченное объемное содержание заполнителя наряду с применением высокоэффективного суперпластификатора является ключевым элементом технологии [1]. Для получения в таких бетонах расхода цемента, приемлемого с точки зрения усадки, трещиностойкости, тепловыделения при твердении, себестоимости и других характеристик, необходимо замещение значительной части цемента активными и инертными минеральными добавками.

Доменный гранулированный шлак всегда рассматривался в качестве одной из наиболее перспективных минеральных добавок, способных заменить часть клинкера в цементе без значительного снижения его характеристик. За счет такой замены в различные периоды развития строительной индустрии решались разнообразные задачи – снижение дефицита цемента и себестоимости его производства, повышение стойкости к сульфатной коррозии и эффективности тепловой обработки бетона, снижение ресурсоемкости производства и выбросов CO₂ в атмосферу.

Имеется большой опыт применения шлака в качестве минеральной добавки, проведены всесторонние исследования его влияния на

структурообразование и свойства цементов [2, 3]. Введение шлака в состав бетона может снижать его морозостойкость, устойчивость к карбонизации и прочность, особенно в раннем возрасте, но при этом шлак уменьшает проницаемость и повышает коррозионную стойкость, а также улучшает другие характеристики бетона [3].

В то же время результаты некоторых исследований показывают, что влияние доменного гранулированного шлака на свойства цемента может иметь различный, иногда непредсказуемый характер. Так, установлено [4], что увеличение дозировки шлака приводит к повышению усадки бетона. Вместе с тем имеются многочисленные данные [3], показывающие, что шлак может использоваться в качестве минеральной добавки, снижающей усадку.

В качестве причин различного влияния этой добавки на свойства цемента можно отметить различие тонкости помола и морфологии частиц шлака [5], химико-минералогического состава шлака и цемента [2, 3], водовязущих отношений и др. [4, 6]. В связи с этим принятие решения о назначении дозировки шлака, тонкости его помола и других технологических параметров может быть принято только на основе зависимостей, полученных по данным экспериментальных исследований влияния шлака определенного производителя на свойства бетона.

Было исследовано влияние добавки доменных гранулированных шлаков производства трех металлургических предприятий: АО «Уральская сталь», ООО «Мечел-Материалы» и ПАО «НЛМК» – на свойства самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов.

Шлак производства ООО «Мечел-Материалы» имел удельную поверхность $455 \text{ м}^2/\text{кг}$, а шлаки производства АО «Уральская сталь» и ПАО «НЛМК» измельчались в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности 455 и $442 \text{ м}^2/\text{кг}$ соответственно. Химический состав шлаков приведен в таблице.

Таблица

Оксидный состав исследованных шлаков, %

Оксид	АО «Уральская сталь»	ООО «Мечел-Материалы»	ПАО «НЛМК»
SiO ₂	35,95	36,93	38,83
Al ₂ O ₃	7,68	10,63	7,98
Fe ₂ O ₃	8,05	0,43	0,37
CaO	30,49	37,86	42,13
MgO	6,08	7,67	7,61
SO ₃	1,26	2,71	0,36
TiO ₂	0,87	0,69	0,61
MnO	0,29	1,21	0,27
K ₂ O	0,60	0,98	0,31
Na ₂ O	0,42	0,03	1,09

Исследования проводились на составах, имевших соотношение вяжущего и песка 1:1,2 при ВЦ 0,3. Смеси изготавливались с применением цемента ООО «ЮУГПК» и суперпластификатора Melflux 6681 при его дозировке 0,5 % от массы вяжущего. Содержание шлака в смешанном цементе составляло 15 и 30 %.

Консистенция мелкозернистой бетонной смеси определялась по ее расплыву из конуса Хегермана (формы-конуса по ГОСТ 310.4-81). Из смеси формовались образцы размером 40×40×160 мм, которые хранились в нормально-влажных условиях, а затем испытывались через 1, 3, 7 и 28 сут.

Усадка определялась на образцах 40×40×160 мм с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Результаты исследования консистенции смеси (рис. 1) показывают, что в составах со шлаком производства ООО «Мечел-Материалы» значительно снижается расплыв смесей до значений ниже требуемых для

самоуплотняющихся смесей – 250-260 мм. Введение в состав цемента других исследованных шлаков практически не оказывает влияния на текучесть смеси (см. рис.1).

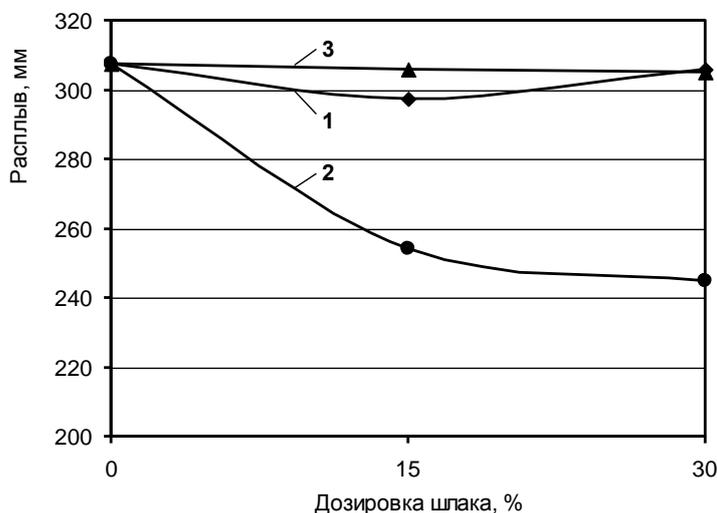


Рис. 1 – Влияние дозировки и вида шлака на расплав смеси:
1 – «Уральская сталь»; 2 – «Мечел-Материалы»; 3 – «НЛМК»

Анализ результатов определения прочности составов с добавками шлаков (рис. 2) показывает, что негативное влияние этот компонент смешанного вяжущего оказывает в основном на прочность в ранние сроки – преимущественно через 1 сутки твердения. Расчеты показали, что коэффициент корреляции между прочностью в эти сроки испытания и модулем основности или модулем активности шлаков не превышает 0,7. При этом коэффициент корреляции между прочностью в ранние сроки и произведением этих двух модулей составляет 0,95. Это позволяет сделать предположение о значимости для темпов твердения в начальные сроки сочетания высоких значений модулей основности и активности шлака.

При дозировке шлака 30 % прочности составов через 1 сутки могут различаться для различных шлаков в 2 раза (рис. 2а), а в сравнении с контрольным бездобавочным составом – в 3-4 раза. Независимо от

производителя при дозировке шлака 15 % прочность бетона снижается на 25-30 % по сравнению с контрольным составом.

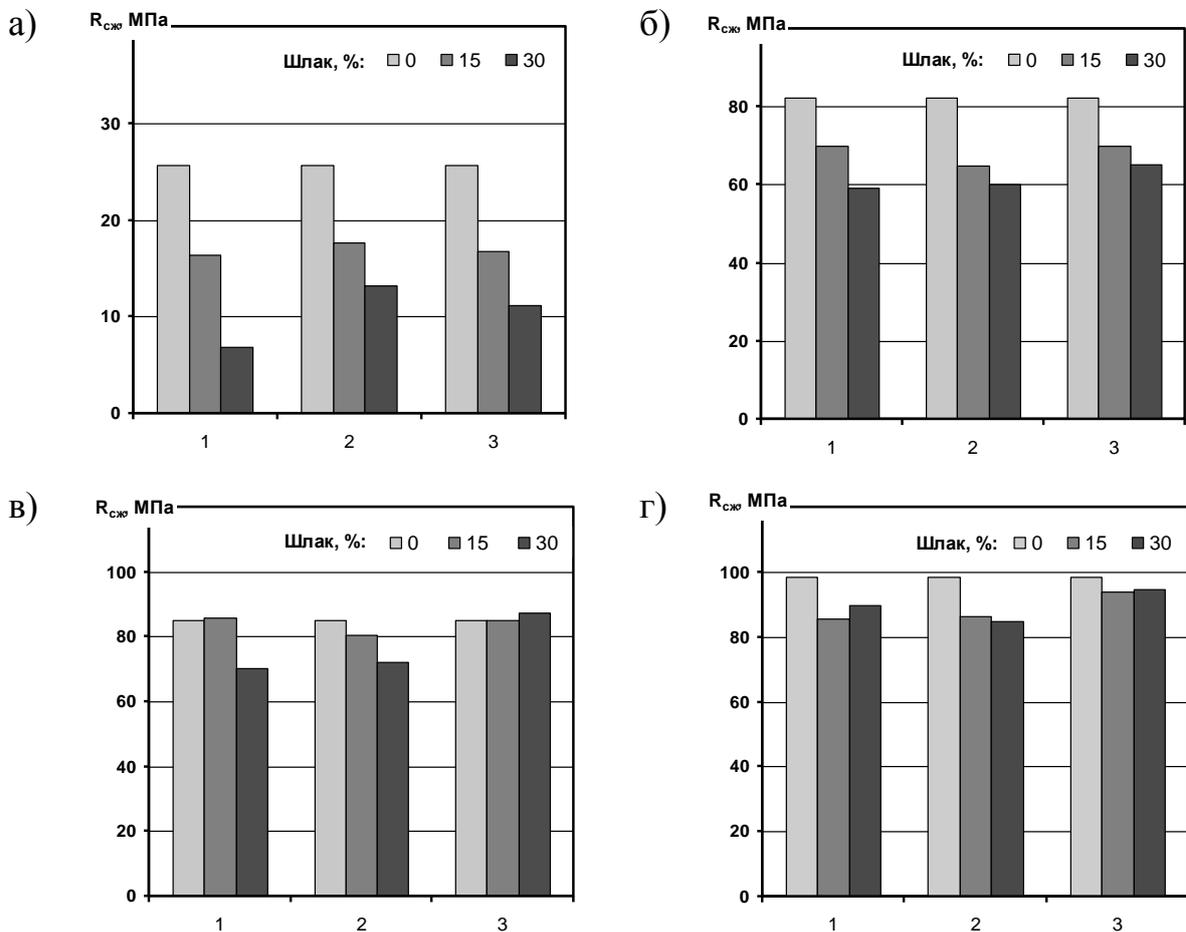


Рис. 2 – Влияние вида и дозировки шлака на прочность бетона при сжатии через 1 (а), 3 (б), 7 (в) и 28 (г) сут: 1 – «Уральская сталь», 2 – «Мечел-Материалы»; 3 – «НЛМК»

Снижение прочности составов с добавкой шлака через 3 суток (рис. 2б) значительно меньше: при дозировке шлака 30 % прочность находится в интервале 59-64 МПа, в то время как у контрольного состава прочность составляет 82 МПа.

Благодаря низкому водоцементному отношению исследуемые составы в возрасте 28 суток набрали прочность от 85 до 97 МПа (рис. 2г). На диаграммах видно, что прочность в этом возрасте у составов со шлаком

несколько ниже, чем у контрольного состава, однако она намного выше, чем требуется для смесей монтажного, ремонтного, инъекционного назначений, а также для тонкостенных железобетонных изделий, для производства которых целесообразно использовать самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны. В связи с этим целесообразно введение в состав исследованных самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов инертных и малоактивных минеральных добавок для снижения прочности до необходимого уровня – 20-50 МПа.

Введение в состав пластифицированных бетонов минеральных добавок, снижающих прочность, может быть использовано в качестве основного управляющего прочностью бетона фактора. Эффективность использования этого фактора обусловлена невозможностью изменения расхода воды для регулирования прочности бетона в связи с тем, что даже незначительное отклонение от оптимального расхода воды в самоуплотняющихся составах с добавками суперпластификаторов может вызвать резкое снижение удобоукладываемости или расслоение бетонной смеси [7]. Эффективность применения минеральных добавок для управления прочностью мелкозернистых бетонов показана в ряде исследований [8-10].

Исследование зависимости усадки от дозировки исследованных шлаков показало, что эта добавка позволяет значительно уменьшить усадочные деформации. Как видно на рис. 3, введение шлака до 30 % позволяет снизить усадку образцов через 90 суток хранения их на воздухе с 0,6 до 0,1-0,45 мм/м.

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что наиболее эффективной добавкой, снижающей усадку, является шлак «НЛМК», причем значения усадки при введении этой добавки в количестве 15 и 30 % в исследованные составы примерно равны. При использовании наименее эффективной добавки – шлака «Уральская сталь» дозировка оказывает значительное

влияние на усадку (рис. 3а). Можно отметить, что чем значительнее шлак снижает усадку, тем менее значима дозировка добавки в интервале 15-30 %.

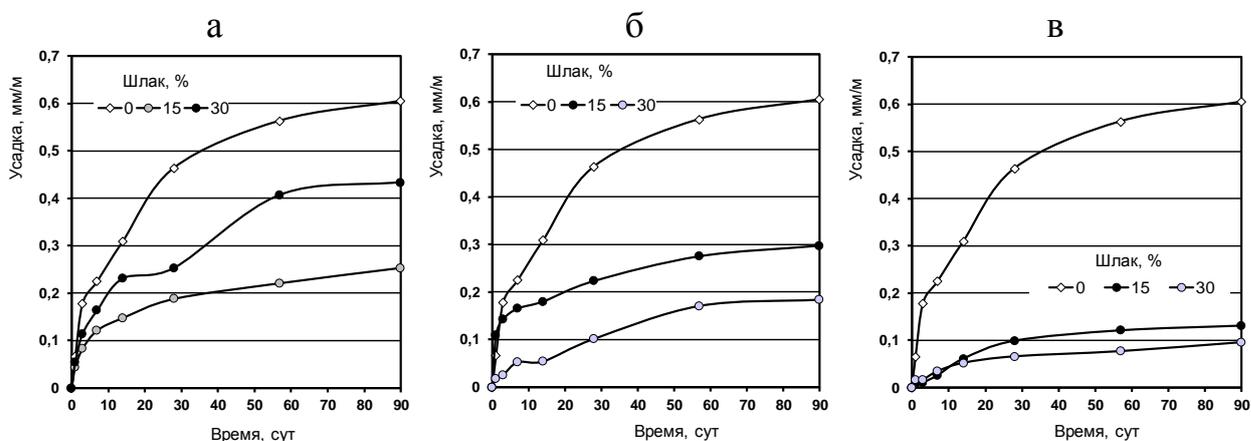


Рис. 3 – Влияние содержания шлака «Уральская сталь» (а), «Мечел-Материалы» (б), «НЛМК» (в) на усадку бетона

Выводы

Исследование влияния прочностных характеристик шлаков показало, что применение шлака производства ПАО «НЛМК» позволяет получить более высокую прочность мелкозернистого бетона, чем при использовании шлаков производства АО «Уральская сталь» и ООО «Мечел-Материалы». Однако даже при использовании менее активных шлаков, прочность бетонов в возрасте 28 суток выше 80 МПа, что свидетельствует о высокой эффективности применения этих шлаков в исследованных составах.

Установлено, что применение в качестве минеральной добавки исследованных шлаков позволяет значительно снизить усадку мелкозернистых бетонов.

Литература

1. Оучи М. Самоуплотняющиеся бетоны: разработка, применение и ключевые технологии // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: труды 1-й Всерос. конф. по бетону и железобетону. М.: 2001. С. 209–215.

2. Будников П.П., Значко-Яворский И.Л. Гранулированные доменные шлаки и шлаковые цементы. М.: Промстройиздат, 1953. 224 с.
 3. Rashad A.M. An overview on rheology, mechanical properties and durability of high-volume slag used as a cement replacement in paste, mortar and concrete // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 187. pp. 89-117.
 4. Hu X., Shi Z., Shi C., Wu Z., Tong B., Ou Z., de Schutter G. Drying shrinkage and cracking resistance of concrete made with ternary cementitious components // *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 149. pp. 406-415.
 5. He T., Li Z., Zhao S., Zhao X., Qu X. Study on the particle morphology, powder characteristics and hydration activity of blast furnace slag prepared by different grinding methods // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 270. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121445.
 6. Zhang W., Hama Y., Na S.H. Drying shrinkage and microstructure characteristics of mortar incorporating ground granulated blast furnace slag and shrinkage reducing admixture // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 93. pp. 267-277.
 7. Коровкин М.О., Петухов А.В., Ерошкина Н.А., Саденко С.М. Деформационно-прочностные свойства цементно-зольного бетона с добавкой микрокварца // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 5. URL: ivdon.ru/magazine/archive/N5y2019/5962.
 8. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Соотношение размера частиц в полидисперсных структурах как первый шаг к оптимизации составов композиционных вяжущих // *Инженерный вестник Дона*. 2013. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1596/.
 9. Шляхова Е.А., Холостова А.И. К вопросу повышения качества мелкозернистых бетонов на мелких песках // *Инженерный вестник Дона*. 2013. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2110/.
-

10. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Бетоны на комплексном вяжущем и мелком песке // Инженерный вестник Дона. 2013. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1562/.

References

1. Ouchi M. Beton na rubezhe tret'ego tysyacheletiya: trudy 1-y Vseros. konf. po betonu i zhelezobetonu [Concrete at the turn of the third millen.: Proc. of the 1st National Conf. on concrete and reinforced concrete]. M.: 2001. pp. 209–215.
2. Budnikov P.P., Znachko-Yavorskiy I.L. Granulirovannye domennye shlaki i shlakovye tsementy [Granulated blast furnace slags and slag cements]. M.: Promstroyizdat, 1953. 224 p.
3. Rashad A.M. Construction and Build. Materials. 2018. Vol. 187. pp. 89-117.
4. Hu X., Shi Z., Shi C., Wu Z., Tong B., Ou Z., de Schutter G. Construction and Building Materials. 2017. Vol. 149. pp. 406-415.
5. He T., Li Z., Zhao S., Zhao X., Qu X. Construction and Building Materials. 2021. Vol. 270. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121445.
6. Zhang W., Hama Y., Na S.H. Construction and Building Materials. 2015. Vol. 93. pp. 267-277.
7. Korovkin M.O., Petukhov A.V., Eroshkina N.A., Sadenko S.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2019. № 5. URL: ivdon.ru/magazine/archive/N5y2019/5962.
8. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1596/.
9. Shlyakhova E.A., Kholostova A.I. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/2110/.
10. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1562/.