

УДК 691.542

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ДОМЕННОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ШЛАКА В БЕТОНАХ С ДОБАВКОЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИКАРБОКСИЛАТНОГО ЭФИРА

**Кононова О.В., Анисимов С.Н., Смирнов А.О., Лешканов А.Ю.**

*ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,  
Йошкар-Ола, e-mail: KononovaOV@volgatech.net, ansernik3@gmail.com*

Исследовано влияние на прочность тяжелого бетона частичной замены портландцемента класса ЦЕМ I 42,5 Н с удельной поверхностью 346 м<sup>2</sup>/кг доменным гранулированным шлаком с высокой удельной поверхностью 499 м<sup>2</sup>/кг. Бетонные образцы изготавливались из смесей с подвижностью 12 см и твердели в нормальных условиях. Эксперименты выполнены на бетоне с содержанием вяжущего вещества 300 кг/м<sup>3</sup>. Исследовались 2 серии образцов: без суперпластификатора и с суперпластификатором поликарбоксилатного типа Glenium® ACE 430. Установлено, что в серии образцов без суперпластификатора замена до 10% портландцемента доменным гранулированным шлаком повышает прочность при сжатии бетона на 13%. Дальнейшее увеличение доли доменного гранулированного шлака в вяжущем до 30% понижает прочность через 3 суток твердения на 25% и конечную прочность бетона на 7%. В присутствии суперпластификатора Glenium ACE 430 прочность всех составов повысилась. Замещение более 10% портландцемента доменным гранулированным шлаком (ДГШ) в модифицированном бетоне существенно отражается на снижении ранней и конечной прочности бетона.

**Ключевые слова:** минеральная добавка, доменный гранулированный шлак, суперпластификатор, прочность, тяжелый бетон

## POLYCARBOXYLATE BASED CONCRETE WITH ADDITIVES GRANULATED BLAST FURNACE SLAG USE EFFECTIVENESS

**Kononova O.V., Anisimov S.N., Smirnov A.O., Leshkanov A.Yu.**

*Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola,  
e-mail: KononovaOV@volgatech.net, ansernik3@gmail.com*

The heavy concrete strength effect of specific surface 346 m<sup>2</sup>/kg partial class CEM I 42,5 N Portland cement replacement with high specific surface of 499 m<sup>2</sup>/kg granulated blast furnace slag studied. Concrete samples were prepared from mixtures with a mobility of 12 cm and hardened under normal conditions. Experiments were carried out at 300 kg/m<sup>3</sup> concrete binder content. Two series of samples studied: no superplasticizer and polycarboxylate type Glenium® ACE 430 superplasticizer. It is found that in a series of without superplasticizer samples replacing up to 10% of Portland cement with granulated blast slag increases the concrete compressive strength by 13%. Further increase of granulated blast furnace slag percentage in the binder to 30% lowers the strength after 3 days curing at 25% and final concrete strength at 7%. The strength of all the compositions with Glenium ACE 430 superplasticizer increased. More than 10% of Portland cement replacement with granulated blast furnace slag in a modified concrete reflected significantly in the concrete early and final strength decrease.

**Keywords:** mineral supplement, granulated blast furnace slag, superplasticizer, strength, heavy concrete

В настоящее время одним из приоритетных направлений в области исследования строительных материалов является совершенствование составов и технологии бетонов с целью дальнейшего повышения их качества и долговечности [1; 2; 6; 9; 11].

С использованием бетона в «классическом» виде, то есть без минеральных и химических добавок, достижение поставленной задачи практически недоступно. Поэтому в технологии современного бетона применяют модификаторы различного действия: структурирующие, пластифицирующие, регулирующие скорость твердения, а также комплексные модификаторы полифункционального действия [2; 9; 11]. В части повышения качества и долговечности бетона особенно значительный эффект в последние годы был достигнут от созда-

ния и применения в бетонах комплексных модификаторов на органико-минеральной основе, полученных с использованием суперпластификаторов нового поколения и активных и малоактивных полидисперсных минеральных добавок [2; 3]. В настоящее время в практике строительства все большее применение находят суперпластификаторы на основе поликарбоксилатного эфира (РСЕ) [1; 4; 11], так как они отличаются не только высокой водоредуцирующей способностью, но при этом увеличивают период сохраняемости бетонных смесей и придают бетону способность к самоуплотнению, что отвечает самым высоким требованиям, предъявляемым к бетонным смесям для монолитного строительства [12].

В качестве минеральных добавок находят применение высокодисперсные добавки

микрокремнезема, метакаолина, ультрадисперсного известняка, золы-уноса, доменного гранулированного шлака и других добавок, позволяющих управлять структурой, а также технологическими и эксплуатационными свойствами бетонов [1].

Хорошо известны такие свойства многих тонкодисперсных минеральных добавок, как их способность к самостоятельному твердению и к взаимодействию с портландитом с образованием низкоосновных гидросиликатов кальция CSH фазы, повышающих содержание и стабильность цементного геля [12].

Исследователи отмечают возможность регулирования с помощью тонкомолотых минеральных добавок температурных и объемных изменений твердеющих композиций, а также позитивное влияние минеральных добавок на структуру цементного камня, в частности на соотношение капиллярных и гелевых пор. Отмечается влияние ультрадисперсного известняка на интенсификацию ранней гидратации цемента [11].

В целом рациональное применение минеральных добавок способствует повышению плотности, прочности и стойкости бетона в агрессивных средах.

Среди минеральных добавок – доменный гранулированный шлак – наиболее изученная, общепризнанная в мире минеральная добавка, широко применяемая в практике производства цемента и бетонов [5].

В период 70-х годов XX века в СССР с добавками доменного гранулированного шлака выпускалось более половины объема производимого в стране цемента [5]. Сегодня в Великобритании ежегодно для замены портландцемента в бетоне используется более 2 млн т доменного гранулированного шлака. Его использование в производстве цемента сокращает выбросы в атмосферу диоксида углерода почти на 2 млн т. Расход электроэнергии сокращается на 2000 ГВт/год. Ежегодная экономия природных сырьевых материалов от применения доменного гранулированного шлака для приготовления бетона составляет 2,5 млн т [10].

Как микронаполнитель доменный гранулированный шлак участвует в улучшении структуры бетонов, улучшает качество поверхности железобетонных изделий. С другой стороны, доменный гранулированный шлак имеет активную стекловидную структуру, что химически проявляется в его способности к самостоятельному твердению. Кремний образует в структуре шлаков тетраэдры  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ , более или менее полимеризованные. Возможны двойные тетраэдры  $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$ , или цепи  $[\text{SiO}_3]^{2-}$ . Катионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$  занимают пустоты между эти-

ми элементами и, чем больше доля катионов, тем больше изолированы друг от друга тетраэдры  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  и тем более реакционно-способным становится шлак [7; 10].

На рост реакционной способности шлака положительное воздействие оказывает тепло-влажностная обработка: за счет пропаривания бетонов, в которых портландцемент на 20...50% по массе замещен доменным гранулированным шлаком при сохранении прочности удается повысить морозостойкость бетонов [12].

Исследования подтверждают тесную связь гидравлической активности шлаков с удельной поверхностью. Если удельная поверхность доменного гранулированного шлака близка к  $600 \text{ м}^2/\text{кг}$ , его реакционная способность мало зависит от химического состава, то есть для любого шлака высока [7].

При совместном помоле цемента и доменного гранулированного шлака шлак, как правило, имеет меньшую удельную поверхность, чем чистоклинкерный цемент. Представляется, что раздельное применение в бетонах цемента и доменного гранулированного шлака повышенной дисперсности, а также модификация составов бетона суперпластификатором на поликарбоксилатной основе позволит повысить эффективность от применения доменного гранулированного шлака в бетоне.

**Целью исследования** являлось изучение влияния совместного применения высокодисперсного доменного гранулированного шлака и поликарбоксилатного суперпластификатора на формирование прочности и кинетику твердения тяжелого бетона.

### Материалы и методы исследования

Исследовано влияние частичной замены цемента в бетоне молотым доменным гранулированным шлаком производства ООО «Мечел-Материалы» GGBS450 (ТУ 0799-001-99126491-2013) на прочность и кинетику набора прочности тяжелого бетона, модифицированного поликарбоксилатным суперпластификатором Glenium® ACE 430 компании BASF. Проба доменного гранулированного шлака с удельной поверхностью  $S_{уд} = 499 \text{ м}^2/\text{кг}$  и коэффициентом качества 1,45 в количестве 98,9% прошла через сито № 0045. Содержание стекловидной фазы в шлаке составляло 70,1%, активность в возрасте 28 суток нормального твердения – 12,2 МПа. Химический состав шлака приведен в табл. 1.

В качестве вяжущего применялся портландцемент с удельной поверхностью  $S_{уд.н} = 346 \text{ м}^2/\text{кг}$  класса ЦЕМ I 42,5Н производства ООО «Топкинский цемент», который имел следующий минералогический состав:  $\text{C}_3\text{S} = 60,9\%$ ,  $\text{C}_2\text{S} = 15,6\%$ ,  $\text{C}_4\text{AF} = 12,8\%$ ,  $\text{C}_3\text{A} = 7,0\%$ . В процессе эксперимента портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н замещался в бетоне высокодисперсным доменным гранулированным шлаком на 0...30% по массе.

**Таблица 1**

Химический состав доменного гранулированного шлака

SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	S	MnO
36,5	35,1	13,3	12,9	0,27	0,56	0,45	0,75	0,35	0,27

Добавка Glenium® ACE 430 относится к новому поколению суперпластификаторов на основе поликарбоксилатного эфира для железобетонных конструкций, придающих высокую подвижность бетонной смеси и способность к самоуплотнению. Быстро адсорбируясь на поверхности частиц цемента, добавка при этом не препятствует доступу воды к его поверхности. Поликарбоксилатный суперпластификатор Glenium®ACE430 вводился в количестве 1% от массы вяжущего. Контрольный состав бетона не содержал суперпластификатора и доменного гранулированного шлака.

В качестве крупного заполнителя использовался плотный доломитовый щебень фракции 5/20 мм, с прочностью по дробимости 1200. В качестве мелкого заполнителя применялся природный кварцевый песок с модулем крупности  $M_k = 1,9$ .

Смеси приготавливались в лабораторном смесителе. Поликарбоксилатный суперпластификатор Glenium®ACE430 вводился в бетонную смесь с последней третью воды затворения после пятиминутного перемешивания. После этого смесь дополнительно перемешивалась в течение 3 минут. Содержание воды подбиралось таким образом, чтобы обеспечить получение равноподвижных бетонных смесей марки ПЗ по осадке конуса.

Из бетонных смесей виброуплотнением в течение 10 с формовались образцы-кубы размерами 100×100×100 мм. Прочность бетона на сжатие контролировалась в возрасте 3, 7 и 28 суток твердения в нормальных условиях.

**Результаты исследования и их обсуждение**

В табл. 2 приведены составы равноподвижных бетонных смесей с маркой по удобоукладываемости ПЗ (ОК = 12 ± 1 см).

Из табл. 2 видно, что замена цемента доменным гранулированным шлаком не приводит к заметным изменениям водопотребности равноподвижных бетонных смесей. Добавление в состав бетона поликарбоксилатного суперпластификатора Glenium®ACE430 в количестве 1% от массы цемента позволило снизить водопотребность равноподвижных бетонных смесей на 17%.

На рис. 1 представлена зависимость прочности тяжелого бетона от частичной замены портландцемента высокодисперсным доменным гранулированным шлаком. При частичной замене 10% портландцемента доменным гранулированным шлаком прочность при сжатии бетона повысилась на 13% как в 3-суточном возрасте, так и через 28 суток твердения в нормальных условиях.

Дальнейшее увеличение доли доменного гранулированного шлака в составе вяжущего ведет к снижению кинетики роста прочности в ранний период твердения. При замене 20% цемента доменным гранулированным шлаком прочность при сжатии образцов бетона на 3-и сутки твердения снизилась в сравнении с составом без добавки на 19%. На 28-е сутки твердения прочность этого состава практически не отличается от контрольного состава на чистоклинкерном цементе.

Замещение 30% цемента доменным гранулированным шлаком уменьшает прочность бетона в сравнении с составом без шлака на 25% на 3-и сутки твердения, на 14% на 7-е сутки и на 7% в возрасте 28 суток.

**Таблица 2**

Составы и водопотребность равноподвижных бетонных смесей

Номер состава	Расходы материалов на 1 м <sup>3</sup> бетона					Водовяжущее отношение, В/(Ц + ДГШ)
	Щебень, кг	Песок, кг	Вяжущее, (Ц + ДГШ), кг		GleniumACE 430, % от массы вяжущего	
			Цемент (Ц), кг	Доменный гранулированный шлак (ДГШ), кг		
1	1350	700	300	0	0	0,54
2	1350	700	270	30	0	0,53
3	1350	700	240	60	0	0,53
4	1350	700	210	90	0	0,55
5	1350	700	300	0	1	0,45
6	1350	700	270	30	1	0,45
7	1350	700	240	60	1	0,45
8	1350	700	210	90	1	0,44

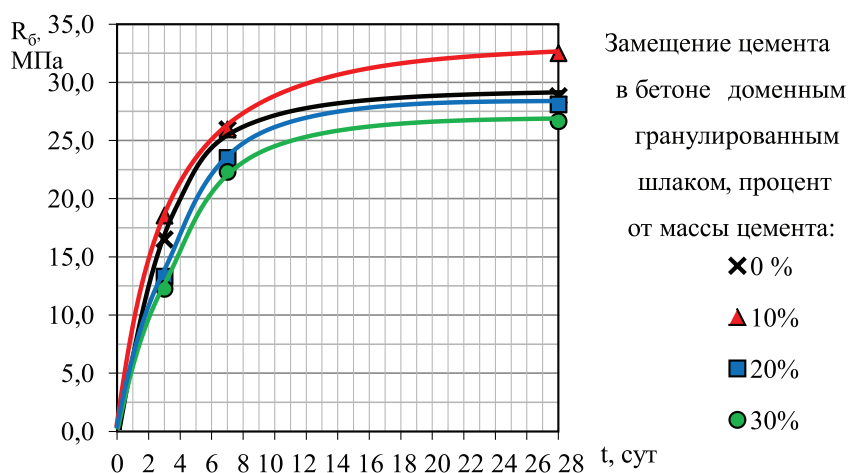


Рис. 1. Влияние частичной замены портландцемента доменным гранулированным шлаком на кинетику роста прочности тяжелого бетона  $R_{\sigma}$ , МПа

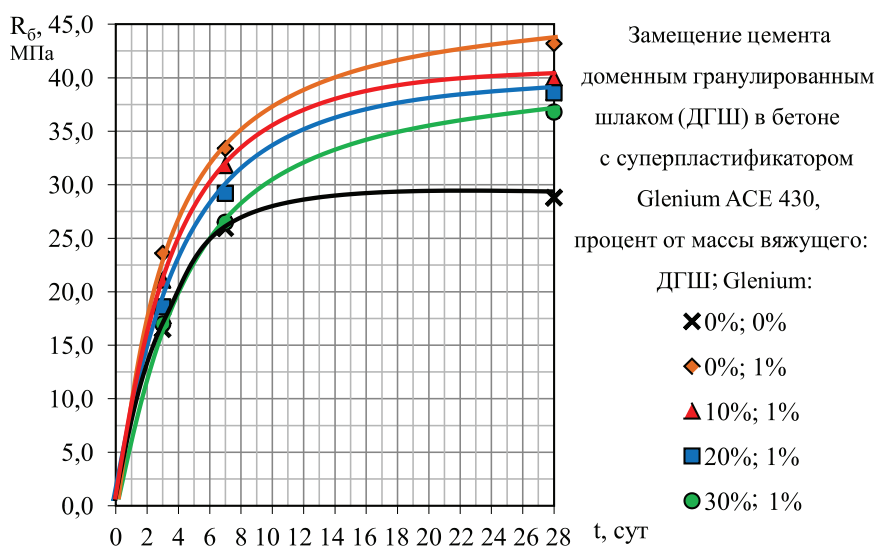


Рис. 2. Влияние частичной замены портландцемента доменным гранулированным шлаком на прочность тяжелого бетона, модифицированного добавкой Glenium ACE 430

На рис. 2 приведено влияние частичной замены портландцемента доменным гранулированным шлаком на прочность тяжелого бетона, модифицированного добавкой Glenium® ACE 430.

В сравнении с контрольным немодифицированным составом бетона введение суперпластификатора Glenium® ACE 430 в количестве 1% от массы вяжущего позволило повысить прочность при сжатии всех исследуемых составов через 28 суток твердения в нормальных условиях на 48...28% в зависимости от содержания доменного гранулированного шлака в составе вяжущего.

Установлено, что у составов на основе портландцемента класса ЦЕМ I 42,5Н введение суперпластификатора Glenium® ACE 430 в количестве 1% от массы цемента не снижает

кинетику нарастания прочности бетона. Частичная замена 10...30% портландцемента в модифицированных составах доменным гранулированным шлаком понижает кинетику роста ранней прочности бетона.

Так, при замене 30% цемента доменным гранулированным шлаком прочность бетона в присутствии суперпластификатора Glenium® ACE 430, на 3-и и 7-е сутки практически равна прочности контрольного немодифицированного состава бетона, в то время как через 28 суток она превышает прочность контрольного состава на 28%. Полученный результат свидетельствует о замедлении кинетики роста прочности модифицированного бетона при повышении доли доменного гранулированного шлака в вяжущем.

### Выводы

1. Исследованиями немодифицированных составов бетона установлено, что частичная замена 10 % портландцемента класса ЦЕМ I 42,5Н доменным гранулированным шлаком с высокой удельной поверхностью 499 м<sup>2</sup>/кг обеспечивает прирост прочности бетона через 28 суток на 13 % и не снижает кинетики роста ранней прочности при твердении в нормальных условиях.

2. Увеличение доли высокодисперсного доменного гранулированного шлака в вяжущем до 30 % понижает прочность бетона через 3 суток твердения на 25 % и конечную прочность на 7 %. При этом частичная замена до 30 % портландцемента доменным гранулированным шлаком практически не меняет водопотребность равноподвижных немодифицированных бетонных смесей.

3. Применение суперпластификатора Glenium® ACE 430 в бетоне в количестве 1 % от массы вяжущего снижает водопотребность равноподвижных бетонных смесей на 17 % и повышает прочность при сжатии бетона на 48 %. Замещение более 10 % портландцемента доменным гранулированным шлаком в модифицированном бетоне в большей степени отражается на снижении ранней и в меньшей степени на 28-суточной прочности бетона.

4. При частичной замене до 30 % портландцемента доменным гранулированным шлаком преимущество в 28-суточной прочности при сжатии модифицированного бетона снижается с 48 до 28 % в сравнении с контрольным немодифицированным составом.

### Список литературы

1. Анисимов С.Н., Кононова О.В., Минаков Ю.А., Лешканов А.Ю., Смирнов А.О. Исследование прочности тяжелого бетона с пластифицирующими и минеральными

добавками // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2–1; URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=21276> (дата обращения: 21.03.2016).

2. Батраков В.Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 4–7.

3. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Мороз М.Н., Троянов И.Ю., Володин В.М., Суздальцев О.В. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов // Строительные материалы. – 2014. – № 5. – С. 88–91.

4. Кравцов А.В., Цыбакин С.В., Виноградова Е.А., Бородин Л.М. Бетоны с органоминеральной добавкой на основе тонкомолотого шлака медеплавильного производства // Вестник МГ СУ. – 2016. – № 2. – С. 86–97.

5. Легалов И.Н. Шлакопортландцементы и бетоны на их основе / И.Н. Легалов, Е.Е. Александров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sng-moscv.ru/shlakoportlandcementy-i-betony-na-ih-osnove.html>. – Дата обращения (02.10.2012).

6. Максимова И.Н., Макридин Н.И., Ерофеев В.Т., Скачков Ю.П. Прочность и параметры разрушения цементных композитов. Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 360 с.

7. Мерик Ж.-П. Конгресс по химии цемента и его рекомендации по использованию современных видов цемента: пер. ст. с франц. Т.И. Таташиной / Ж.-П. Мерик, И. Вон Ев. – М.: Всесоюз. центр переводов, 1983. – 48 с.

8. Пугин К.Г., Юшков Б.С. Ресурсосберегающие технологии и снижение экологической нагрузки при производстве бетонных изделий с использованием доменных шлаков // Научные исследования и инновации / ГОУ ВПО «Пермский гос. техн. ун-т». – 2010. – № 3 – С. 72–79.

9. Ткач Е.В. Влияние органоминерального модификатора на физико-механические и деформативные свойства бетона / Е.В. Ткач, М.А. Рахимов, Б.М. Тоимбаева, Г.М. Рахимова // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3–2. – С. 428–431.

10. Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я., Шудьяков К.В. Влияние количества шлака в цементе на морозостойкость тяжелого бетона // Строительные материалы: научно-технический и производственный журнал / ООО РИФ «Стройматериалы». – 2013. – № 9. – С. 96–100.

11. Ущеров-Маршак А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы // Строительные материалы. – 2006. – № 10. – С. 8–12.

12. Othmane Boukendakdji, El-Hadj Kadri, Said Kenai. Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete // Cement and Concrete Composites. – 2012. – Vol. 34, Issue 4. – P. 583–590.