

УДК 691.542

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТВЕРДЕНИЯ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО  
БЕТОНА С ДОБАВКОЙ ДОМЕННОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ШЛАКА****Кононова О.В., Минаков Ю.А., Анисимов С.Н., Лешканов А.Ю.,  
Смирнов А.О., Губин Н.В.***ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» Йошкар-Ола,  
e-mail: KononovaOV@volgatech.net, ansernik3@gmail.com*

Изучена кинетика твердения бетона в нормальных условиях, после тепловлажностной обработки и в присутствии добавки Кратасол при частичной замене 40...50% портландцемента доменным гранулированным шлаком. В исследованиях применялся высокодисперсный доменный гранулированный шлак с удельной поверхностью 499 м<sup>2</sup>/кг и активностью 12,2 МПа. Контрольные составы бетона с расходом портландцемента 300 кг/м<sup>3</sup> не содержали добавку высокодисперсного доменного гранулированного шлака. Испытания показали, что прочность при сжатии бетона в возрасте 3 суток твердения в нормальных условиях ниже прочности контрольных составов на 46...53%, а в возрасте 28 суток ниже прочности контрольных составов на 5,8...12,7%. Вследствие интенсификации твердения шлака после тепловлажностной обработки по режиму (3 + 6 + 2) ч прочность бетона в возрасте 1 суток оказалась ниже прочности контрольных составов только на 16,1...22,6%, а в возрасте 28 суток на 7,7%. При совместном применении тепловлажностной обработки и пластифицирующей полифункциональной добавки Кратасол в возрасте 1 суток прочность при сжатии бетона отстает от прочности контрольных составов на 13,8...16,7%. В возрасте 28 суток прочность основных составов практически не отличается от прочности контрольных составов.

**Ключевые слова:** кинетика твердения, тяжелый бетон, высокодисперсный доменный гранулированный шлак, тепловлажностная обработка, прочность при сжатии, пластифицирующая полифункциональная добавка Кратасол

**MODIFIED CONCRETE WITH GRANULATED BLAST-FURNACE SLAG ADDITIVE  
HARDENING INTENSIFICATION****Kononova O.V., Minakov Yu.A., Anisimov S.N., Leshkanov A.Yu., Smirnov A.O., Gubin N.V.***Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola,  
e-mail: KononovaOV@volgatech.net, ansernik3@gmail.com*

The kinetics of concrete hardening in normal conditions, after heat and humidity treatment, in the presence of Kratasol additive at partial replacement of 40...50% of Portland cement with finely granulated blast furnace slag studied. The studies used a granulated blast furnace slag with a specific surface of 499 m<sup>2</sup>/kg and 12,2 MPa activities. The control samples of concrete compositions with 300 kg/m<sup>3</sup> Portland cement do not contain finely granulated blast furnace slag additive. The tests have shown that concrete compressive strength after 3 days of normal hardening is 46...53% lower than the strength of control samples, and after 28 days it is 5,8...12,7% lower. As a result of the slag hardening intensification after the heat and humidity treatment according to mode (3 + 6 + 2) h the strength of the concrete at the age of 1 day was only 16,1...22,6% below the control samples strength, and after 28 days at 7,7%. When combined heat and humidity processing and Kratasol multifunctional plasticizing additive and aged 1 day concrete compressive strength is 13,8...16,7% below the strength of the control compositions. At the age of 28 days the strength of the basic compositions is practically identical to the control samples strength.

**Keywords:** kinetics of hardening, heavy concrete, finely granulated blast furnace slag, heat and humidity processing, compressive strength, Kratasol multifunctional plasticizing additive

Снижение стоимости строительства за счет использования побочных продуктов производства и применения местных материалов остается в настоящее время одной из приоритетных задач в области совершенствования составов строительных материалов. В частности, продолжают исследования, направленные на снижение стоимости цемента введением в их состав молотых минеральных природных и техногенных добавок. Накоплен положительный опыт применения в составе цемента таких техногенных минеральных добавок, как зола-унос ТЭС, микрокремнезем, доменный гранулированный шлак [3; 7]. Применение молотого доменного гранулированного шлака

в качестве минеральной добавки к цементу решает ряд задач: утилизацию побочного продукта производства, снижение себестоимости бетона, повышение стойкости бетона к коррозии. Опыт использования шлако-содержащих цементов в бетонах доказал их неоспоримое преимущество в части формирования таких свойств, как повышенные водо- и сульфатостойкость, пониженная экзотермия, предохраняющая массивные бетонные конструкции от возникновения микро- и макротрещин [2; 6; 7].

Доменный гранулированный шлак способен гидратироваться без применения дополнительных вяжущих компонентов, но медленнее, чем клинкерные минералы.

Продукты гидратации клинкерных минералов, включая известь, обволакивают зерна шлака и способствуют возбуждению его гидравлической активности [1; 6]. Пониженная кинетика роста ранней прочности бетонов на основе шлакосодержащих цементов снижает темпы строительных работ, что вызывает наибольшее опасения у потребителей шлакосодержащих цементов [2; 4].

Опыт исследования влияния химических модификаторов на кинетику твердения шлакосодержащих бетонов показал высокую эффективность применения комплексных химических модификаторов пластифицирующего действия, способных снижать водопотребность бетонных смесей и ускорять кинетику ранней прочности [2; 4; 5].

При совместном помоле цемента с доменным гранулированным шлаком удельная поверхность шлака, как правило ниже, чем клинкерной части цемента, так как его твердость выше [7]. Представляется, что не только химический состав шлака, но и его повышенная удельная поверхность способны оказать активирующее влияние на кинетику твердения шлакосодержащих цементов и бетонов.

**Целью исследования** является анализ влияния тепловлажностной обработки на кинетику твердения бетонов, приготовленных из подвижных бетонных смесей с химическим модификатором пластифицирующего действия на основе цементов с повышенным содержанием высокодисперсного доменного гранулированного шлака.

#### Материалы и методы исследования

Исследовано влияние частичной замены цемента в бетоне высокодисперсным доменным гранулированным шлаком производства ООО «Мечел-Материалы» GGBS450 (ТУ 0799-001-99126491-2013) на прочность и кинетику набора прочности тяжелого бетона. В качестве вяжущего применялся портландцемент с удельной поверхностью  $S_{уд} = 346 \text{ м}^2/\text{кг}$  класса ЦЕМ I 42,5Н производства ООО «Топкинский цемент», который имел следующий минералогический состав:  $C_3S = 60,9\%$ ,  $C_2S = 15,6\%$ ,  $C_4AF = 12,8\%$ ,  $C_3A = 7,0\%$ . В качестве базового состава использовался бетон с содержанием цемента  $300 \text{ кг}/\text{м}^3$ , щебня –  $1350 \text{ кг}/\text{м}^3$  и песка –  $700 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Исследования выполнены на равноподвижных бетонных смесях с маркой по удобоукладываемости ПЗ (ОК =  $12 \pm 2 \text{ см}$ ).

В процессе эксперимента портландцемент класса ЦЕМ I 42,5Н замещался в бетоне высокодисперсным доменным гранулированным шлаком на 40...50% по массе. Проба высокодисперсного доменного гранулированного шлака имела удельную поверхность  $S_{уд} = 499 \text{ м}^2/\text{кг}$ , коэффициент качества 1,45. Через контрольное сито № 0045 прошло 98,9% пробы. Содержание стекловидной фазы в шлаке составляло 70,1%. Шлак показал активность в возрасте 28 суток 12,2 МПа.

В качестве крупного заполнителя в бетоне использовался плотный доломитовый щебень фракции 5/20 мм, с прочностью по дробимости 1200. В качестве мелкого заполнителя применялся местный при-

родный мелкозернистый кварцевый песок с модулем крупности  $M_k = 1,6$ .

Для пластифицирования бетона использовался полифункциональный модификатор Кратасол производства компании ПАО «Пигмент», представляющий собой смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот с повышенным содержанием высокомолекулярных фракций. Влияние Кратасола исследовано при его содержании в бетоне в количестве 0,4% от массы цемента.

Смеси приготавливались в лабораторном смесителе. Пластификатор Кратасол вводился в бетонную смесь с последней третью воды затворения после пятиминутного перемешивания. После этого смесь дополнительно перемешивалась в течение 3 минут. Из бетонных смесей виброуплотнением формовались образцы-кубы размерами  $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ .

Первая серия образцов бетона твердела в камере нормального твердения при температуре  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  и относительной влажности 95% (НУ). Вторая серия образцов бетона после тепловлажностной обработки (ТВО) по режиму (3 + 6 + 2) ч до 28 суток также твердела в камере нормального твердения. В каждой серии часть образцов содержала химический модификатор Кратасол.

Прочность при сжатии образцов бетона нормального твердения контролировалась в возрасте 3, 7 и 28 суток. Контроль прочности образцов бетона, прошедших тепловлажностную обработку, выполнялся в возрасте 1, 7, и 28 суток твердения.

#### Результаты исследования и их обсуждение

В таблице приведены составы равноподвижных бетонных смесей с маркой по удобоукладываемости ПЗ (ОК =  $12 \pm 2 \text{ см}$ ).

Как видно из данных, представленных в таблице, замещение портландцемента на 50% доменным гранулированным шлаком приводит к снижению водовяжущего отношения равноподвижных немодифицированных бетонных смесей на 5% (составы 1–6). В присутствии 0,4% Кратасола аналогичное замещение снижает водовяжущее отношение на 9% (составы 7–12). Частичная замена цемента на 50% высокодисперсным доменным гранулированным шлаком и применение добавки Кратасол в сумме снизили водовяжущее отношение равноподвижной бетонной смеси с 0,62 до 0,52, что составило 16% (составы 1, 11).

На рис. 1 приведены результаты исследования кинетики роста прочности немодифицированного бетона в зависимости от содержания высокодисперсного доменного гранулированного шлака и условий твердения. При частичной замене портландцемента на 40...50% доменным гранулированным шлаком наблюдается существенное замедление в кинетике роста прочности бетона на ранней стадии твердения бетона в нормальных условиях (НУ). Эти составы отстают в росте прочности от контрольных составов в возрасте трех суток на 46...53%.

## Составы и водопотребность равноподвижных бетонных смесей

Номер состава	Вяжущее, (Ц + GGBS450), кг/м <sup>3</sup> бетона		Кратасол, % от массы вяжущего	Условия твердения	Водовяжущее отношение, В/(Ц + GGBS450)
	Цемент, (Ц) кг	GGBS450, кг			
1	300	0	–	ТВО	0,62
2	300	0	–	НУ	0,62
3	180	120	–	ТВО	0,60
4	180	120	–	НУ	0,60
5	150	150	–	ТВО	0,59
6	150	150	–	НУ	0,59
7	300	0	0,4	ТВО	0,57
8	300	0	0,4	НУ	0,57
9	180	120	0,4	ТВО	0,55
10	180	120	0,4	НУ	0,55
11	150	150	0,4	ТВО	0,52
12	150	150	0,4	НУ	0,52

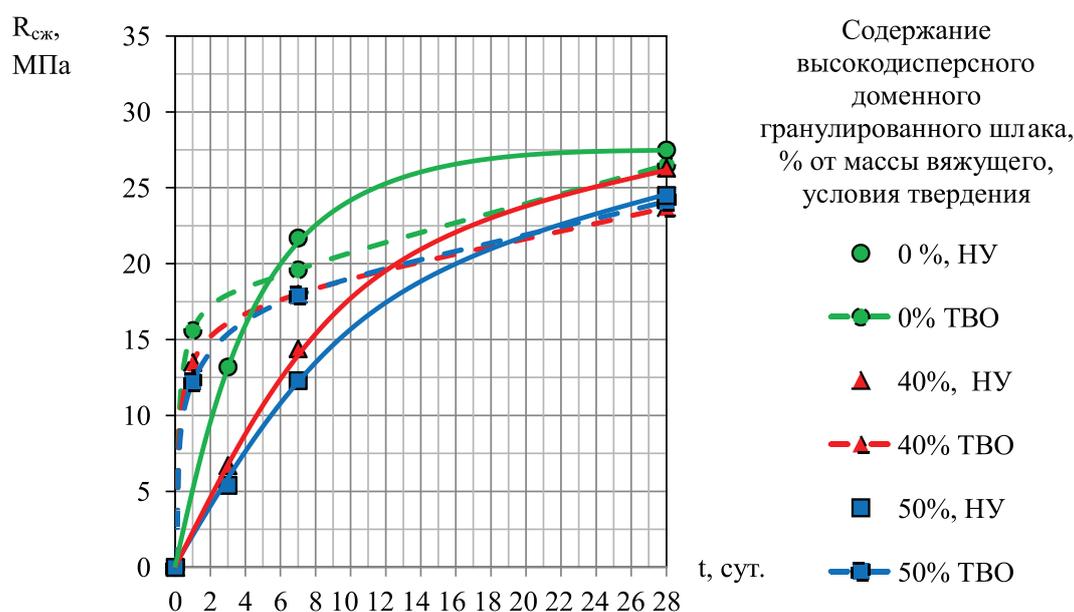


Рис. 1. Кинетика роста прочности немофицированного бетона в зависимости от содержания высокодисперсного доменного гранулированного шлака в цементе и условий твердения

В возрасте 7 суток отмечено отставание прочности основных составов с добавкой доменного гранулированного шлака от контрольных составов бетона на 36,3...43,1%. Через 28 суток твердения в результате частичной замены цемента на 40...50% по массе высокодисперсным доменным гра-

нулированным шлаком получены составы с прочностью при сжатии ниже контрольных на 5,8...12,7%.

Твердение шлакосодержащего бетона после тепловлажностной обработки идет более интенсивно. Через сутки в сравнении с контрольными составами, не содержащими

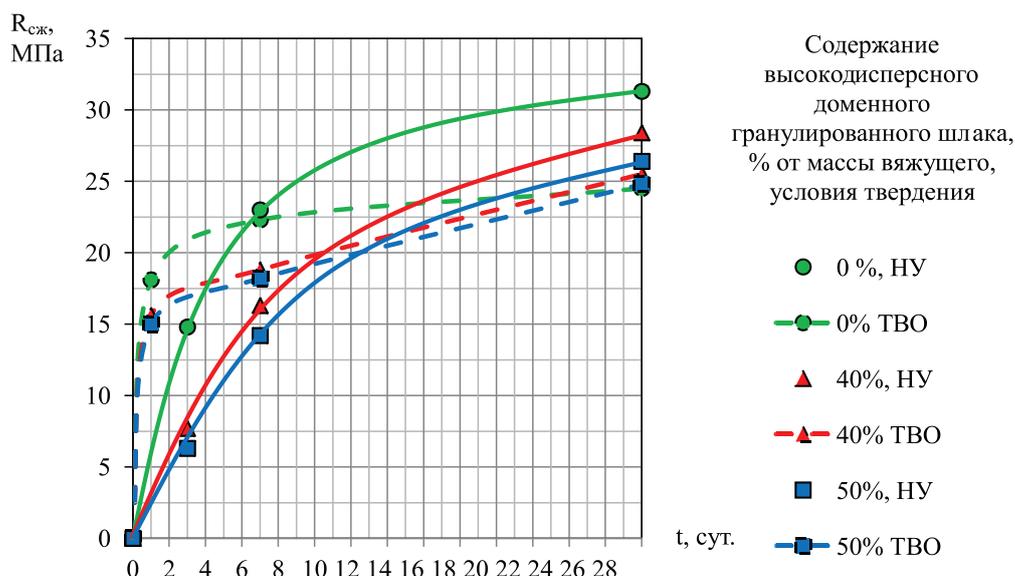


Рис. 2. Кинетика роста прочности бетона, модифицированного добавкой Кратасол, в зависимости от содержания высокодисперсного доменного гранулированного шлака в цементе и условий твердения

доменный гранулированный шлак, снижение прочности бетона при частичной замене портландцемента высокодисперсным доменным гранулированным шлаком на 40...50% составило 16,1...22,6%. В период от 7 до 28 суток снижение прочности бетона не превышало 7,7%.

На рис. 2 приведена кинетика роста прочности бетона, модифицированного добавкой Кратасол.

В присутствии Кратасола выявленные особенности в кинетике нарастания прочности исследуемых составов бетона в целом сохраняются. В рамках соблюдения принципа равноподвижности за счет применения Кратасола в возрасте 28 суток прочность контрольного состава возросла с 27,5 до 32,0 МПа (составы 2 и 8). То есть прирост прочности составил 16%. Основные составы с добавкой Кратасол, содержащие в цементе 40...50% доменного гранулированного шлака, в возрасте 28 суток нормального твердения приобрели прочность 28...26,7 МПа, что практически совпадает с прочностью контрольных немодифицированных составов.

Применение Кратасола при обеспечении равноподвижности бетонных смесей привело к увеличению прочности бетона, не содержащего доменный гранулированный шлак, в период от 3 до 28 суток в среднем на 12%. При замене цемента на 40...50% высокодисперсным доменным гранулированным шлаком прирост прочности бетона в период твердения от 3 до 28 суток под влиянием Кратасола в среднем составил около

8%. Таким образом, применение Кратасола в шлакосодержащих цементах с точки зрения формирования прочности бетонов нормального твердения менее эффективно.

После тепловлажностной обработки в суточном возрасте прочность при сжатии бетона, содержащего 40...50% шлака GGBS450 и 0,4% от массы вяжущего пластификатора Кратасол оказалась ниже прочности контрольных составов на 13,8...16,7%. Замещение портландцемента шлаком GGBS450 на 40...50% от массы цемента приводит к снижению прочности пластифицированного пропаренного бетона в возрасте 7 суток на 6...8%.

### Выводы

1. Исследованиями установлено, что прочность при сжатии бетона в возрасте 28 суток при твердении в нормальных условиях и частичной замене цемента на 40...50% по массе высокодисперсным доменным гранулированным шлаком снижается на 5,8...12,7%. При этом отмечается отставание в кинетике ранней прочности бетона: в возрасте 3 суток – на 46...53%, в возрасте 7 суток – на 36,3...43,1%.

2. При тепловлажностной обработке по режиму (3 + 6 + 2) ч частичная замена цемента на 40...50% высокодисперсным доменным гранулированным шлаком в меньшей степени понижает кинетику роста прочности бетона. Через сутки в сравнении с контрольными составами, не содержащими доменный гранулированный шлак, снижение прочности бетона

составило 16,1...22,6%. В период от 7 до 28 суток снижение прочности бетона не превышало 7,7%.

3. В присутствии Кратасола в целом сохраняются закономерности кинетики роста прочности бетона в нормальных условиях твердения, выявленные для непластифицированного бетона, но прирост прочности бетона на шлакосодержавшем цементе от водоредуцирующего эффекта имеет меньшие значения. Применение Кратасола при обеспечении равноподвижности бетонных смесей привело к увеличению прочности бетона, не содержащего доменный гранулированный шлак, в период от 3 до 28 суток в среднем на 12%. При замене цемента на 40...50% высокодисперсным доменным гранулированным шлаком прирост прочности бетона в период твердения от 3 до 28 суток под влиянием Кратасола в среднем составил около 8%.

4. Сравнение прочности бетонов, модифицированных добавкой Кратасол, показало, что при замене портландцемента на 40...50% высокодисперсным шлаком прочность составов после тепловлажностной обработки по режиму (3 + 6 + 2) ч в возрасте 1 суток отстает от прочности составов, не содержащих шлак, на 13,8...16,7%. При этом значения прочности модифицированных составов с высокодисперсным шлаком и составов

без шлака и модификатора в возрасте 28 суток практически равны.

### Список литературы

1. Артамонова А.В. Шлакощелочные вяжущие на основе доменных гранулированных шлаков центробежноударного измельчения / А.В. Артамонова, К.М. Воронин // Цемент и его применение. – 2011. – № 4. – С. 108–113.
2. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Гарницкий Ю.В. Эффективность различных способов повышения ранней прочности бетона нормального твердения на шлакосодержавших цементах [Электронный ресурс] // СтройБетон – Оборудование для производства пенобетона / Статьи/ Статьи о бетоне [сайт] / Завод Стройбетон. – Режим доступа: <http://www.ibeton.ru/a199.php> (6.10.2015).
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. Кононова О.В., Анисимов С.Н., Смирнов А.О., Лешканов А.Ю. Эффективность применения доменного гранулированного шлака в бетонах с добавкой на основе поликарбоксилатного эфира // Современные наукоемкие технологии. — 2016. – № 6–2. – С. 259–263.
5. Кравцов А.В., Цыбакин С.В., Виноградова Е.А., Бородин Л.М. Бетоны с органоминеральной добавкой на основе тонкомолотого шлака медеплавильного производства // Вестник МГСУ. – 2016. – № 2. – С. 86–97.
6. Трофимов Б.Я., Киль П.Н., Шулдяков К.В. Активность шлака и обеспечение морозостойкости бетона на цементах с добавкой доменного гранулированного шлака // Наука ЮУрГУ, 2014: материалы 66-й научной конференции. – С. 1043–1050.
7. Хердтл Р. Долговечность бетонов на основе многокомпонентных цементов / Р. Хердтл, М. Дитерманн, К. Шмидт // Цемент и его применение. – 2011. – № 1. – С. 76–80.