

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

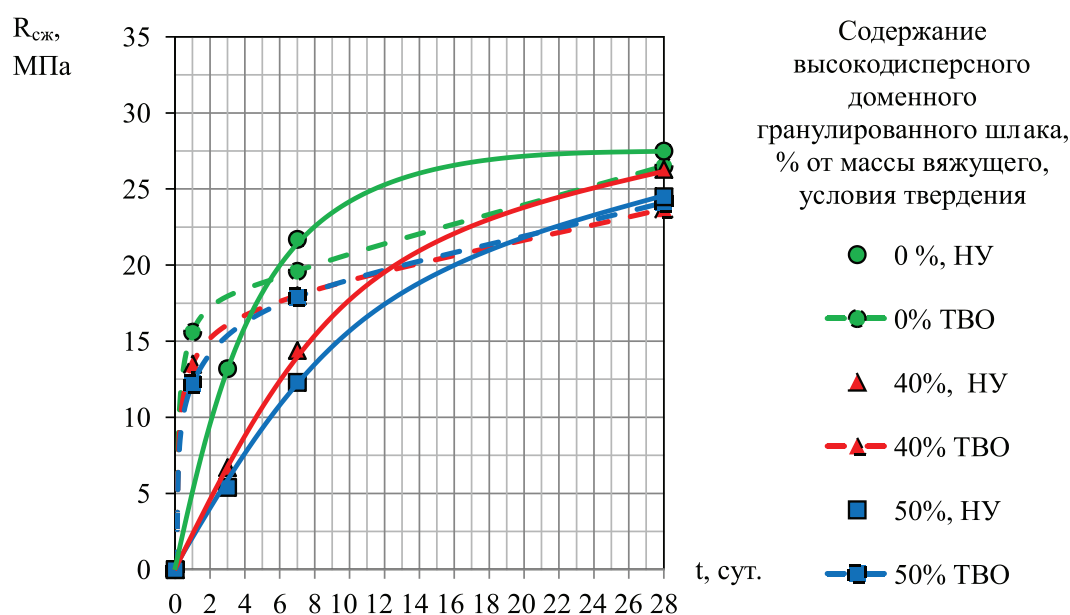


Рис. 1. Кинетика роста прочности не модифицированного бетона в зависимости от содержания высокодисперсного доменного гранулированного шлака в цементе и условий твердения

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

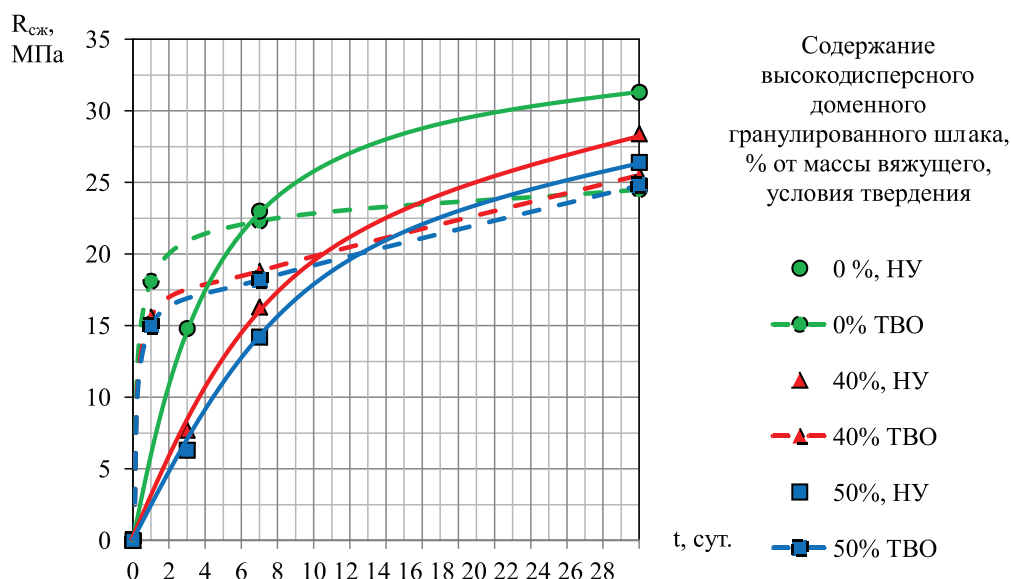


Рис. 2. Кинетика роста прочности бетона, модифицированного добавкой Кратасол, в зависимости от содержания высокодисперсного доменного гранулированного шлака в цементе и условий твердения

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 шлакосодержашем 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 шлакосодержаших 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.