

Кинетика набора прочности бетонов на композиционном вяжущем, наполненном молотым доменным граншлаком

И.И. Романенко, И.Н. Петровнина

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

Аннотация: Выявлено влияние доменного молотого граншлака на кинетику набора прочности бетонов, приготовленных на композиционном вяжущем. Композиционное вяжущее содержало портландцемент в количестве 70, 60 и 50 %, а остальное молотый граншлак. Установлено, что на раннем этапе набора прочности бетоны на композиционном вяжущем имеют прочность ниже бетонов, приготовленных на портландцементе на 10-24%. Однако, в возрасте 28 суток, прочность бетонов на композиционном вяжущем соответствует прочности бетонов на портландцементе. Применяя поликорбоксилатные гиперпластификаторы, удалось получить бетоны с В/Ц отношением, равным 0,25-0,35, что позволило добиться высокой ранней прочности, превышающей контрольные составы на 10-20%.

Ключевые слова: портландцемент, граншлак, помол, композиционное вяжущее, кинетика набора прочности, гиперпластификатор, кинетика набора прочности.

Производство портландцемента сопровождается выбросами углекислого газа в атмосферу в количестве 900-920 кг на тонну портландцемента [1 - 3], что приводит к парниковому эффекту. Поэтому, одним из способов решения экологической проблемы является снижение выбросов CO₂ в атмосферу за счет сокращения производства вяжущего. В то же время рост темпов возведения жилья, строительство дорог и других сооружений из года в год требует все большего количества выпуска портландцемента, а этого можно добиться за счет получения композиционных вяжущих на основе молотых доменных граншлаков. Особенно высокие темпы строительства за последние десять лет наблюдаются в Китае и США, и по анализу экономического роста темпы в будущем будут только расти [4 - 6].

В качестве модификатора портландцемента и структуры цементной матрицы используют золу уноса, молотый кремнезем и пыль газоочистки. Такие бетоны называют «зелеными» [5 - 7].

Использование молотого граншлака в количестве 30 - 40 % от портландцемента позволяет получить бетоны с высокой прочностью [5, 6]. Для этого требовалось осуществлять помол граншлаков до удельной поверхности 4000 – 5000 см²/г, а это приводит к повышению стоимости 1 т вяжущего на 25 -55 % относительно без добавочного вяжущего [5, 7].

Содержание в доменном шлаке большого количества СаО и MgO (5-8 %) приводит систему к неравномерному изменению объема при гидратации вяжущего, что вызывает образование трещин в бетоне и снижению эксплуатационных свойств [8,9].

Ряд исследователей пытались максимально заменить цементный клинкер на молотый граншлак. Наполнение системы шлаком составило 60 %, в тоже время такое вяжущее характеризовалось низкими темпами набора прочности и использовалось как вяжущее для закладных смесей [10 -12]. Проектные значения прочности определялись в возрасте 60 и 90 суток твердения.

Замена в бетонах расход портландцемента на молотые доменные шлаки способствует замедлению набора прочности, что отрицательно сказывается на монолитном строительстве, которое не позволяет в возрасте трех - семи суток снимать опалубку и нагружать конструкции проектными нагрузками [9, 12].

Материалы и методики исследований

В качестве вяжущего использовали без добавочный портландцемент марки ПЦ500Д0 (СЕМІ/42,5Н) производства ООО «Мордовцемент». Удельная поверхность $S_{уд} = 3050$ см²/г. Модификатор портландцемента - молотый доменный граншлак производства Новолипецкого металлургического комбината (ПАО «НМЛК») фракции 0 - 5 мм в лабораторной шаровой мельнице до удельной поверхности 3100 – 3250 см²/г,

истинная плотность 2926 кг/м^3 , химический состав представлен в таблице №1.

Таблица №1

Химический состав молотого граншлака НМЛК

Химические компоненты сталеплавильного шлака								
MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅	примеси
7.4	61.1	14.1	9.7	4.4	0,8	1.9	0.5	остальное

Заполнители бетонной смеси: мелкий – песок кварцевый с модулем крупности $M_{кр}$ 1,8 - 2,2; крупный – щебень гранитный фракции 5,0 - 10,0 мм, марка по дробимости в цилиндре М 800-1100. Гиперпластификатор – «Sika Visco Crete 5-600 SK» на основе поликарбоксилатных эфиров, сухой остаток (С.О.) 30 г/100мл. Вода затворения – питьевая. Осадка конуса (О.К.) бетонной смеси 15 - 18 см. Бетонная смесь готовилась в лабораторном планетарном смесителе в течении 5 мин для получения гомогенной смеси. Образцы бетона формовались в металлических формах тройках с размером ячейки $100 \times 100 \times 100$ мм.

Твердение образцов происходило первые 24 часа в формах и камере нормального твердения ($T = 20 + 5 \text{ }^\circ\text{C}$; $W = 90 + 5 \%$), затем в камере нормального твердения до срока испытания, в воде при температуре воды $T_{H20} = 20 + 3 \text{ }^\circ\text{C}$. Испытания на прочность производятся на 3, 7 и 28 сутки на гидравлическом прессе. Исследуемые составы и результаты испытаний представлены в таблице № 2.

В таблице № 2 представлены средние результаты при испытания по три образца на каждую точку. Из полученных данных видно, что на ранних этапах твердения в камере нормального твердения (до 7 суток) прочность бетонов на композиционном вяжущем ниже, чем у контрольного состава (состав 1, таблица № 2). Начиная с 7 суток и до 28 суток оптимальным

Таблица №2

Составы и физико-механические свойства исследуемых бетонов

Ингредиенты, расходы на 1м ³ , свойства	Составы			
	1 ПТЦ:Ш (1:0)	2 ПТЦ:Ш (0,7:0,3)	3 ПТЦ:Ш (0,6:0,4)	4 ПТЦ:Ш (0,5:0,5)
СЕМІ-42,5Н, кг/объем м ³	567/183	397/128	340/109	283/91
Молотый граншлак, кг	-	170/59	227/78	283/97
Кварцевый песок М _{кр} , кг	689/259	689/259	689/259	689/259
Гранитный щебень фракции 5-10 мм, кг	1094/416	1094/416	1094/416	1094/416
Sika Visco Crete 5-600 SK, % / л	1,0/6,08	1,0/6,08	1,0/6,08	1,0/6,08
Вода, л	131	131	131	131
Выход бетонной смеси, л	1000	1000	1000	1000
Вес замеса, кг	2480	2480	2480	2480
В/Ц ; В/(Ц+Шлак)	0,23; 0,23	0,234; 0,33	0,23; 0,39	0,23; 0,46
Прочность на сжатие, МПа в возрасте: 24 часа	20,7	17,3	15,8	10,1
3 суток (твердение в нормальных условиях)	33,1	24,3	26,2	25,0
7 суток (твердение в нормальных условиях)	43,8	40,9	50,3	44,5
28 суток (твердение в нормальных условиях)	62,3	61,8	68,9	59,8
90 суток (твердение в нормальных условиях)	65,7	69,2	76,4	72,1
Удельный расход портландцемента на единицу прочности, кг/МПа (УРП)	9,1	6,4	4,93	4,73
Прочность на сжатие, МПа в возрасте: 3 суток (твердение в воде)	33,7	22,6	28,9	21,1
7 суток (твердение в воде)	45,5	43,2	44,7	41,8
28 суток (твердение в воде)	65,0	64,9	64,1	60,3
90 суток (твердение в воде)	67,0	68,5	77,7	73,8
Удельный расход портландцемента на единицу прочности, кг/МПа (УРП)	8,7	6,1	5,3	4,7

является состав 3 (таблица № 2) у которого соотношение компонентов вяжущего составляет ПТЦ: Ш = 60 %: 40 % и прочность на сжатие превышает результаты контрольного состава на 10,6 %. Остальные составы в возрасте 28 суток имеют близкие значения с контрольным. Таким образом можно предположить, что молотый доменный граншлак проявляет гидравлическую активность в щелочной среде цементной матрицы из-за наличия в продуктах гидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($\text{pH} > 12$) и обеспечивает набор прочности образцов с дефицитом клинкерного фонда до значений контрольных образцов в более поздние сроки. Бетон удовлетворяет требованиям распалубке и нагружению в возрасте 7 суток твердения т. к прочность превышает показатель 38,0 МПа.

Достигнута максимальная экономия портландцемента для смеси состава (состав 4, таблица № 2) ПТЦ: Ш=50: 50, что позволило снизить расход цемента на 50 %, то есть, на 283 кг/м^3 и, тем самым, сократить выбросы парниковых газов (CO_2) в атмосферу.

В более поздние сроки твердения наблюдается также рост по сравнению с контрольным составом, как в нормальных условиях, так и в воде. Прирост прочности в составе 3 по сравнению с составом 1 в возрасте 90 суток составил 16 % как при твердении в камере, так и при твердении в воде. Прирост прочности связан с гидратацией молотого доменного граншлака. Полученные результаты подтверждают ранее проведенные исследования [7,13].

Нет существенной разницы в кинетике набора прочности при твердении образцов бетона в различных условиях твердения. В таблице № 3 представлены данные, полученные в возрасте 28 суток твердения в разных условиях при испытаниях на изгиб, и определении модуля упругости.

Бетоны, твердеющие в водной среде при температуре, имеют более высокую прочность на изгиб и модуль упругости, чем бетоны, твердевшие в

камере нормального твердения. Такая зависимость прослеживается во всех составах и особенно это видно в составах с молотым шлаком. Связано это с лучшей микроструктурой цементного камня из-за наполнения ее молотым

Таблица № 3

Кинетика набора прочности при сжатии и изгибе, определение модуля упругости

Свойства	Составы			
	1 ПТЦ:Ш (1:0)	2 ПТЦ:Ш (0,7:0,3)	3 ПТЦ:Ш (0,6:0,4)	4 ПТЦ:Ш (0,5:0,5)
Прочность на изгиб, МПа в возрасте: 28суток (твердение в нормальных условиях)	5,87	6,4	6,5	6,7
Прочность на изгиб, МПа в возрасте: 28суток (твердение в воде)	7,1	7,1	7,1	7,1
Модуль упругости, МПа в возрасте: 28суток (твердение в нормальных условиях)	38,9	40,1	40,5	40,4
Модуль упругости, МПа в возрасте: 28суток (твердение в воде)	39,0	40,5	41,0	40,7

доменным граншлаком. Композиционное вяжущее, при гидратации цементного клинкера, мелкодисперсного шлака и извести позволяет бетону с течением длительного временного периода существенно набирать прочность за счет синергетического эффекта от проявления пуццолановой реакции. Эта пуццолановая реакция в раннем возрасте не проявляет тенденцию к резкому увеличению прочности, однако резкий прирост прочности в бетонах проявляется после 28 суток твердения и в плоть до 90 суток относительно контрольных составов. Бетонные образцы, твердеющие в водной среде, имеют более высокое значение модуля упругости, чем бетоны, твердевшие в камере нормального твердения (таблица № 3).

Выводы

1. Кинетика набора прочности бетонов на композитном вяжущем с наполнением, молотым граншлаком (40 – 50 %) показывает, что при водоцементном отношении 0,25 - 0,35, бетон набирает высокую прочность на раннем этапе, достаточную, чтобы его можно было использовать в монолитных бетонных изделиях при ранней распалубке.
 2. Бетон на композиционном вяжущем, содержащий молотый доменный граншлак до 50 %, имеет практически такую же прочность на сжатие в возрасте 28 суток твердения, как у контрольного без добавочного состава и твердеющего в камере нормального твердения.
 3. Самое оптимальное содержание в вяжущем молотого доменного граншлака составляет 40 %, так как прочность бетонов на сжатие, приготовленных на этом вяжущем, превышает результаты испытания контрольного состава на 11 % и 16 % в возрасте 28 и 90 суток, соответственно.
 4. Бетон с содержанием композиционного вяжущего с наполнением его до 50 % молотым доменным граншлаком имеет более высокие значения прочности на изгиб, чем контрольные составы при твердении в камере нормального твердения. Прирост прочности бетонов на изгиб в возрасте 28 суток с содержанием молотого шлака 30 %, 40 % и 50 % составляет, соответственно, 9 %, 11 % и 14 %.
 5. Бетоны, твердеющие в воде при температуре 20 °С, имеют более высокую прочность на изгиб, чем бетоны, твердеющие в камере нормального твердения при температуре 20 °С.
 6. В результате реакции гидратации клинкера портландцемента образуется гидросиликат кальция (CSH) и гидроксид кальция Ca(OH)_2 . Прочность цементному камню обеспечивает CSH, а Ca(OH)_2 является побочным продуктом и не обеспечивает повышению прочности. При
-

взаимодействии шлака в композиционном вяжущем с водой и $\text{Ca}(\text{OH})_2$ образуется больше CSH, что и увеличивает прочность бетона, проявляется пуццолановая реакция у шлака.

Литература

1. Alaa M.R., Hosam El-Din H.S., Amir F.S. *Concr. Struct. Mater*, 2014, № 8(1), pp. 69-81.
 2. Siddique R., Deepinder K. *Adv. Res.*, 2012, № 3, pp. 45-51.
 3. Qureshi M.N., Somnath G. *Int. J. Eng. Sci. Invent*, 2013, № 2(2), pp. 24–31.
 4. Parker J. *Building the Shard. Ingenia*, 2012, № 2, 34 p.
 5. Романенко И.И., Петровнина И.Н., Еличев К.А., Козицын В.С. Влияние условий твердения бетона на прочностные показатели // Инженерный вестник Дона, 2022, № 3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7531.
 6. Xian J.L., Jun Q. *Adv. Mater. Res.*, 2010, № 158(1), pp. 1–11.
 7. Романенко И.И., Петровнина И.Н., Еличев К.А. Влияние молотого шлака сталеплавильного производства на свойства композиционного шлакощелочного вяжущего // Инженерный вестник Дона, 2021, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7266.
 8. Фиговский О.Л., Кудрявцев П.Г. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых наноконпозиционных материалов // Инженерный вестник Дона, 2014, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448.
 9. Solanki J. V., Pitroda J. *Sci. Innov. Technol.*, 2013, № 2(1), pp. 173-179.
 10. Jiang Y., Ling T.C., Mo K.H., Shi C. *Environ. Manag*, 2019, № 4, pp. 440-449.
 11. Rahhal V.F., Trezza M.A., Tironi A., Castellano C.C. *Materials*, 2019, № 4, 1650 p.
-



12. Oksri-Nelfia L., Mahieux P.-Y., Amiri O., Turcry P., Lux J. Mater. Struct., 2016, № 49, pp. 3239-3251.

13. Li J., Yang E.-H. Cem. Concr. Compos., 2017, № 78, pp. 33-42.

References

1. Alaa M.R., Hosam El-Din H.S., Amir F.S. Concr. Struct. Mater, 2014, № 8(1), pp. 69-81.

2. Siddique R., Deepinder K. Adv. Res., 2012, № 3, pp. 45-51.

3. Qureshi M.N., Somnath G. Int. J. Eng. Sci. Invent, 2013, № 2(2), pp. 24–31.

4. Parker J. Building the Shard. Ingenia, 2012, № 2, 34 p.

5. Romanenko I.I., Petrovnina I.N., Yelichev K.A., Kozitsyn V.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7531.

6. Xian J.L., Jun Q. Adv. Mater. Res., 2010, № 158(1), pp. 1–11.

7. Romanenko I.I., Petrovnina I.N., Yelichev K.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, № 11. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2021/7266.

8. Figovskiy O.L., Kudryavtsev P.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448.

9. Solanki J. V., Pitroda J. Sci. Innov. Technol., 2013, № 2(1), pp. 173-179.

10. Jiang Y., Ling T.C., Mo K.H., Shi C. Environ. Manag, 2019, № 4, pp. 440-449.

11. Rahhal V.F., Trezza M.A., Tironi A., Castellano C.C. Materials, 2019, № 4, 1650 p.

12. Oksri-Nelfia L., Mahieux P.-Y., Amiri O., Turcry P., Lux J. Mater. Struct., 2016, № 49, pp. 3239-3251.

13. Li J., Yang E.-H. Cem. Concr. Compos, 2017, № 78, pp. 33-42.