

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РАСШИРЯЮЩИХСЯ ВЯЖУЩИХ И БЕТОНОВ НА ИХ ОСНОВЕ

А.И.Панченко, ВНИИжелезобетон, г.Москва

Г.В.Невструев, РГСУ, г.Ростов-на-Дону

Диапазон применения расширяющихся вяжущих сульфаломинатного типа довольно широк и зависит от целей, поставленных в каждом конкретном случае. Например, для разрушения горных пород невзрывным способом необходимо обеспечить возможно большую величину энергии химического расширения, а при двух- или трехосном натяжении арматуры (в трубах, цилиндрических резервуарах), а также при твердении в жесткоограниченных условиях (жестких стыках и др.) необходима хотя и высокая, но, тем не менее, нормированная величина энергии расширения и самонапряжения. Наиболее широкое и весьма эффективное использование расширяющихся вяжущих и, тем более, расширяющихся добавок к портландцементу, возможно в случае необходимости улучшения таких свойств бетона, как усадочная трещиностойкость, непроницаемость, а также стойкость к атмосферным воздействиям. В этом случае на первый план выходит согласованность процессов роста прочности и расширения. Однако в настоящее время очень трудно оценить с достаточной достоверностью степень указанной согласованности процессов, то есть отсутствует критерий, характеризующий эффективность того или иного расширяющегося цемента или расширяющей добавки в бетоне.

В настоящее время для расширяющихся и напрягающих цементов, используемых в конструкциях, твердеющих в свободных условиях (без ограничения деформаций) нормируется лишь величина их свободного расширения. Вместе с тем известно [1, 2], что бетоны с одной и той же величиной свободного расширения в одном случае могут иметь пониженную, а в другом повышенную прочность. В связи с этим величина свободного расширения не является достаточно надежным критерием эффективности РЦ или НЦ. Для напрягающих цементов в соответствии с ТУ 21-20-18-80 и ТУ 21-20-48-82 нормируется и величина самонапряжения (напряжение в бетоне при

ограничении его расширения устройством, эквивалентным 1% армирования).

Одним из параметров, влияющим на величину деформаций и прочность ПЦ и ПЦ по мнению многих ученых является соотношение оксидов алюминия и серы в цементе. Величина этого отношения, рекомендуемого различными авторами в качестве оптимального, колеблется в довольно широких пределах. Данных по исследованию морозостойкости в зависимости от соотношения этих оксидов в литературе не обнаружено.

Авторами проведены исследования морозостойкости бетонов, приготовленных на цементах с расширяющейся добавкой и напрягающих цементах с различным соотношением  $A/S$ , которое менялось от 1,5 до 3,2. В исследованиях были использованы цементы пяти различных заводов, а общее число экспериментальных данных составило 42. На рис. 1а представлены статистически обработанные результаты полученных данных по испытанию цементного камня на морозостойкость при температуре -50°C. Коэффициент корреляции, характеризующий разброс экспериментальных данных по сравнению с величинами, показанными на рис. 1а, как и ожидалось, оказался невелик - 0,66-0,69. Вместе с тем, значительное число экспериментальных данных и наличие явного оптимума на графике позволяют выделить интервал 1,6-1,9, на который нужно ориентироваться при подборе состава расширяющей добавки или расширяющегося (напрягающего) цемента с точки зрения получения структуры цементного камня повышенной морозостойкости.

Такое большое различие величин  $A/S$  (в среднем в 2,3 раза по данным разных авторов [1, 3], рекомендуемых в качестве оптимальных, обусловлено тем, что, используя лишь соотношение оксидов, весьма сложно прогнозировать свойства того или иного цемента с расширяющей добавкой. Причина в том, что твердение такого рода цемента есть результат взаимного влияния многих факторов: минералогического и химического состава, тонкости помола портландцемента, соотношение оксидов, минералогии, удельной плотности расширяющей добавки, ее количества, а также условий твердения. Причем каждый из перечисленных факторов по-своему влияет как на рост прочности, так и на процесс расширения. Например, увеличение количества  $C_3S$  в ПЦ-клинкере с одной стороны ускоряет набор прочности, а с другой - будет

увеличивать расширение из-за большего количества извести в жидкой фазе, образующейся в процессе гидратации и гидролиза трехкальциевого силиката. Как известно, увеличение тонкости помола расширяющегося цемента не только ведет к ускорению твердения, но и к снижению расширения, также как и тепловая обработка, ускоряя набор прочности снижает конечную величину расширения. В связи с этим необходим поиск иного критерия, который отражал бы влияние всех перечисленных факторов в совокупности на конечные свойства цементного камня и бетона.

В формировании свойств цементного камня и бетона в целом существенное значение имеет минералогический состав цемента. Что касается морозостойкости, то здесь особая роль принадлежит трехкальциевому алюминату ( $C_3A$ ). В настоящее время связь долговечности портландцементов с содержанием  $C_3A$  можно считать доказанной.

В отношении расширяющихся или напрягающих цементов таких данных практически нет. Однако морозостойкость бетона на основе расширяющегося или напрягающего цемента не может не зависеть от содержания  $C_3A$  в исходном ПЦ-клинкере хотя бы потому, что его количество составляет от 70 до 90% всей массы цемента.

Исследование морозостойкости и термоморозостойкости цементного камня, приготовленного на расширяющихся цементах с содержанием  $C_3A$  в ПЦ-клинкере от 0,3 до 10% и твердевших как при 20°C, так и при 60°C, показали (рис. 16) прямую зависимость морозостойкости от количества  $C_3A$  в исходном цементе. Коэффициент корреляции в этом случае был выше, чем при исследовании влияния  $A/\bar{S}$  и составил 0,78-0,87. Из рис. 16 видно, что для приготовления РЦ и НЦ и бетонов на их основе, обладающих повышенной морозостойкостью и термоморозостойкостью, необходимо использовать портландцементы с содержанием трехкальциевого алюмината не более 5-6%. При превышении этого предела морозо- и термоморозостойкость цементного камня (а значит и бетона при прочих равных условиях) существенно снижаются.

Структурообразование бетонов есть результат двух параллельно протекающих процессов: конструктивных (рост прочности структуры) и деструктивных (развитие напряжений и трещин). Первые обусловлены кристаллизацией продуктов гидратации, вторые - химической контракцией, влажностной усадкой. Это свойственно и для бе-

тонов на основе расширяющихся вяжущих, за исключением того, что на указанные выше процессы "накладывается" процесс образования этtringита и расширение твердеющего бетона, который так же может являться причиной как конструктивных, так и деструктивных явлений. Ранее автором предложено [ 4 ] разделять образующийся этtringит на "активный" и "пассивный" в зависимости от его морфологии. Образование пассивного этtringита приводит к увеличению твердой фазы и перераспределению напряжений в формирующейся поровой структуре, благоприятно влияя на прочность бетона. Положительное влияние на прочность структуры и контактной зоны оказывает и образование активного этtringита, но в том случае, если вызванное им расширение лишь компенсирует процессы контракции и усадки. Некоторое уплотнение структуры может иметь место и тогда, когда расширение, вызванное образованием активного этtringита, сопровождается возникновением напряжений, не превышающих прочности формирующейся структуры в каждый момент твердения бетона. В противном случае неизбежно образование трещин как в цементном камне, так и в контактной зоне, в местах наибольшего сближения зерен заполнителя [ 5 ].

Известно, что расширяющиеся цементы и бетоны, обладающие очень активным свободным расширением, при твердении в условиях упругого ограничения, не только не теряют прочность, а существенно ее повышают. То есть, налицо эффект самоуплотнения структуры из-за сдерживания деформаций за счет ограничения деформаций извне. При твердении в свободных условиях роль ограничителя химического расширения выполняет кристаллическая структура цементного камня, прочность которой растет во времени.

Величина свободного или связанного расширения - это внешние проявления химической энергии, которой обладает бетон определенного состава, приготовленный на расширяющемся вяжущем и твердевший в определенных температурно-влажностных условиях. При этом величина свободной деформации всегда будет больше, чем величина упругоограниченной деформации, так как любое внешнее усилие будет дополняющим к усилию со стороны структуры твердеющего бетона, сдерживающего химическое расширение бетона. Чем меньше будет разница между свободной и упругоограниченной деформацией того или иного расширяющегося цемента

или бетона, тем с большей эффективностью будет реализовано действие расширяющейся добавки. Поэтому предлагается использовать отношение  $\epsilon_c/\epsilon_y$ , где:  $\epsilon_c$  - деформация в свободном состоянии;  $\epsilon_y$  - деформация в упругоограниченном состоянии, эквивалентном 1% армирования - в качестве критерия оценки эффективности расширяющих и расширяющихся цементов, а так же бетонов на их основе. Вполне логично назвать отношение  $\epsilon_c/\epsilon_y$  показателем деформаций, который характеризует, насколько полно химическая энергия преобразуется в работу расширения в условиях упругого ограничения деформаций по сравнению со свободным расширением.

Таблица 1

Прочность и показатель деформаций бетона с расширяющей добавкой на портландцементе с разной тонкостью помола

Свойства	Удельная поверхность ПЦ, см <sup>2</sup> /г		
	2800	3700	4400
Показатель деформаций $\epsilon_c/\epsilon_y$	13,4	5,6	2,3
Прочность при сжатии, МПа	8,2	27,4	43,2

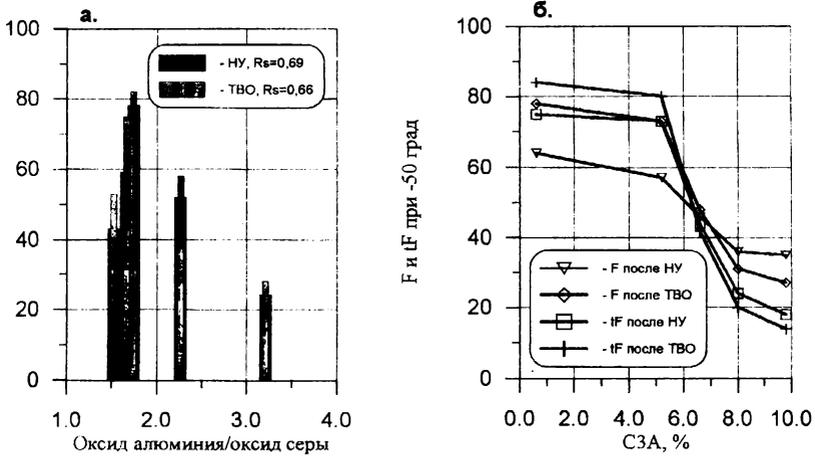
В таблице 1 показано изменение величины показателя деформаций. Как и следовало ожидать, с возрастанием показателя деформаций прочность цементно-песчанного раствора уменьшается. Были проведены специальные исследования зависимости прочности от величины показателя деформаций для бетонов различного вида (тяжелого и легкого) и различных составов. В исследованиях использовались расширяющие цементы и портландцементы с расширяющими добавками, самонапряжение которых колебалось в пределах 0,5-2,5 МПа, а свободное расширение доходило до 3,8%. Аналогичные исследования проводились и на цементном камне. Нетрудно заметить, что зависимость прочности при сжатии от величины показателя деформации бетона близка к линейной, а коэффициент корреляции  $R_s=0,92$ , что говорит о достаточно небольшом отличии экспериментальных данных от кривой, построенной после их статистической обработки. Нужно отметить, что на рис.2 показаны некоторые точки, рассчитанные по данным других авторов, которые хорошо согласуются с резуль-

татами, полученными автором. Из данных рис.2 видно, что максимальное превышение прочности бетона с расширяющей добавкой, по сравнению с аналогичным бетоном на основе портландцемента имеет место при значении показателя деформаций, приближающегося к единице и для практических целей может быть рекомендовано в диапазоне 1,0 - 2,5. Вторым важным выводом является возможность определения критической величины показателя деформаций, то есть того порога, выше которого бетон с расширяющей добавкой будет иметь прочность ниже, чем исходный, без добавки. Из рис.2 следует, что для прочности при сжатии ( $\epsilon_c/\epsilon_y$ )<sub>кр</sub> не должно превышать 6-7. Иными словами, если бетон на основе РЦ или НЦ имеет величину показателя, меньшую, чем 6,0, то в синтезе прочности будут превалировать конструктивные явления, обусловленные присутствием расширяющей добавки. Проявление деструкции следует ожидать, если  $\epsilon_c/\epsilon_y > 7,0$ .

Известно, что прямой зависимости между прочностью и морозостойкостью нет. Одни и те же факторы по-разному могут влиять на эти свойства (например, воздухововлечение), поэтому вполне вероятно, что зависимость морозостойкости от показателя деформаций будет отличаться от таковой в отношении прочности. Сказанное выше, а так же необходимость иметь численное значение критерия эффективности расширяющегося вяжущего или бетона в практических целях для обеспечения необходимой морозостойкости, послужило основанием для проведения специального цикла исследований.

В исследованиях использовались напрягающие цементы различных заводов, а так же расширяющиеся портландцементы, приготовленные на основе глиноземистого шлака или японской расширяющейся добавки DENKA. Во всех случаях сонапряжения цементов не превышало 2,5 МПа. Испытанию на морозостойкость подвергались как тяжелые, так и легкие бетоны с расходом цемента до 350 кг/м<sup>3</sup>, твердевшие в кондукторах, обеспечивающих упругое ограничение деформаций, эквивалентное 1% армирования, а также бетоны свободного твердения.

Изменение морозостойкости керамзитобетона на основе различных цементов с разными величинами  $\epsilon_c/\epsilon_y$ , в зависимости от условий твердения можно проанализировать по данным, приведенным в таблице 2. Результаты испытаний показывают, что



Морозостойкость цементного камня из РЦ с различным содержанием оксида алюминия и серы (а) и трехкальцевого алюмината (б).

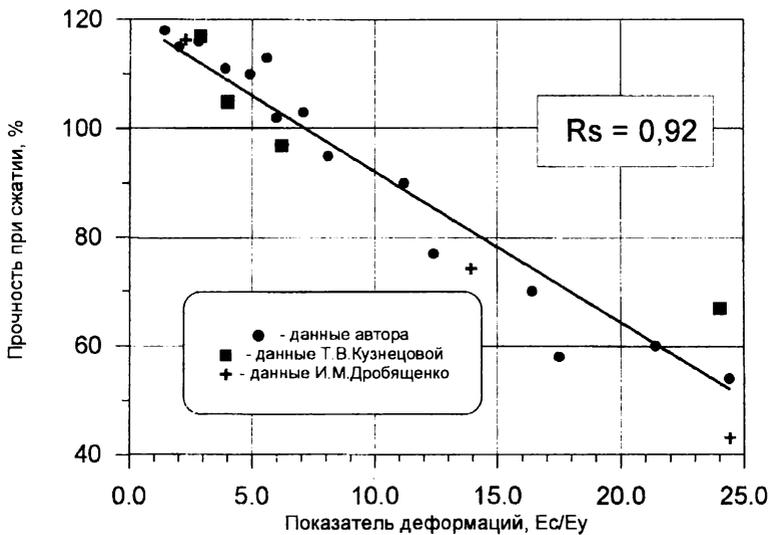


Рис. 2 Прочность при сжатии бетонов с различной величиной показателя деформаций  $E_c/E_u$ .

Морозостойкость и показатель деформаций керамзитобетонов, твердевших в различных условиях

Завод-изготовитель	Свойства цементов			Условия твердения керамзитобетона	F, циклы при -50°C
	R <sub>c</sub> , МПа	S <sub>p</sub> , МПа	ε <sub>c</sub> /ε <sub>y</sub>		
НЦ, Подольский завод	51,0	2,08	13,4	НУ, свободно	33
				НУ, ограничение	100
				ВВ, свободно	30
				ВВ, ограничение	95
				55°C, свободно	56
				55°C, ограничение	98
НЦ, Днепродзержинский завод	44,7	1,51	3,2	НУ, свободно	43
				НУ, ограничение	105
				ВВ, свободно	40
				ВВ, ограничение	102
				55°C, свободно	80
				55°C, ограничение	108
НЦ, Пашийский завод	52,5	1,25	1,64	НУ, свободно	83
				НУ, ограничение	103
				ВВ, свободно	98
				ВВ, ограничение	110
				55°C, свободно	65
				55°C, ограничение	95
ПЦ, Чечено-Ингушский	44,8	-	-	НУ, свободно	39
				55°C, свободно	34

В таблице приняты обозначения: R<sub>c</sub> - прочность при сжатии; S<sub>p</sub> - самоуплотнение; ε<sub>c</sub>/ε<sub>y</sub> - показатель деформаций; F - морозостойкость; НУ - нормальные условия твердения; ВВ - водное выдерживание при 20°C.

чем выше показатель деформаций напрягающего цемента, на основе которого изготовлен бетон, тем ниже его морозостойкость после твердения в свободных условиях.

Причем такая тенденция прослеживается для всех исследованных температурно-влажностных условий.

Аналогичная зависимость видна и между показателем деформаций бетонов и их морозостойкостью. Бетоны, твердевшие в условиях упругого ограничения, показали приблизительно одинаковую морозостойкость независимо от температурно-влажностных условий. Следует также отметить, что при малых значениях  $\varepsilon_c/\varepsilon_y$  морозостойкость бетона на НЦ, твердевшего в свободных условиях, превышает морозостойкость бетона на основе портландцемента более чем в 2 раза. Аналогичный вывод можно сделать и из данных рис.3. Из этого же рисунка видно, что для обеспечения высокой морозостойкости бетона на основе расширяющихся вяжущих, его показатель деформаций не должен превышать значение, равное двум, то есть  $\varepsilon_c/\varepsilon_y < 2,0$ .

Повышение значения показателя деформаций существенно увеличивает разницу морозостойкостей бетонов упругоограниченного и свободного твердения (рис.4). Достоверность данных, приведенных на рис.3 и 4 можно считать достаточно высокой, так как коэффициент корреляции  $R_s$  в обоих зависимостях не менее 0,9.

Сравнивая данные рисунков 2 и 3 можно констатировать, что при повышении значения показателя деформаций бетоны на расширяющихся вяжущих показывают существенно меньшую чувствительность по отношению к прочности, нежели к морозостойкости. При изменении  $\varepsilon_c/\varepsilon_y$  от 1,4-1,6 до 5,0 прочность снижается на 12-15%, а морозостойкость уменьшается вдвое при изменении показателя деформаций в этих же пределах. Происходит это, вероятно, потому, что появляющиеся в структуре микротрещины из-за несоответствия между процессами расширения и роста прочности, по-разному влияют на прочность и морозостойкость бетона. При сжатии бетона процесс его разрушения ускоряется лишь за счет той части от всего количества образовавшихся трещин, которая имеет ориентацию, близкую к направлению действующего усилия сжатия. При замораживании бетона каждая из трещин может быть дополнительным источником разрушения, если она заполнена водой, что весьма вероятно, так как испытание бетона проводится после его интенсивного водонасыщения.

Таким образом, необходимо целенаправленно регулировать процессы расширения и структурообразования расширяющихся или напрягающих цементов и бетонов

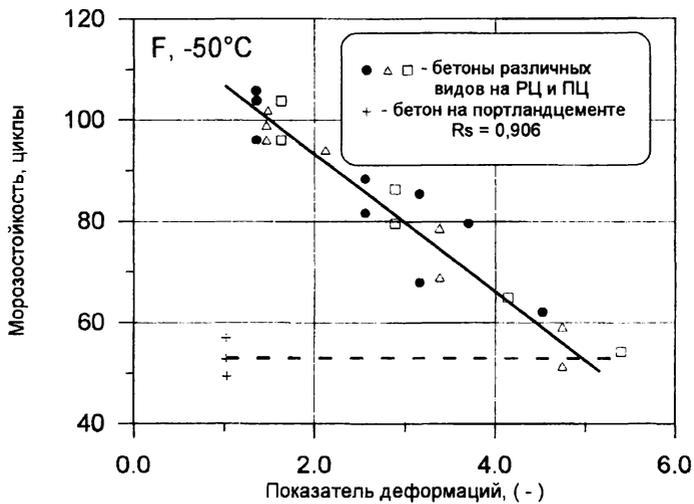


Рис. 3 Зависимость морозостойкости от показателя деформаций.

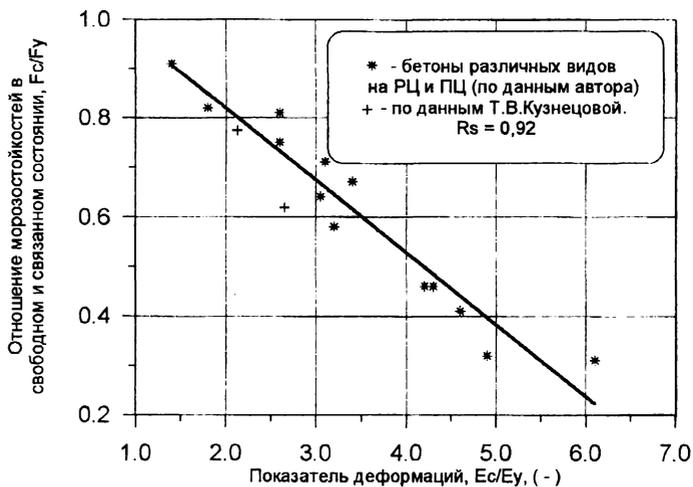


Рис. 4 Изменение морозостойкости бетонов, твердевших в свободном состоянии по сравнению с упругоограниченным в зависимости от показателя деформаций.

на их основе. Способы управления процессом расширения приведены в [ 5 ]. Рекомендованные соотношения оксидов алюминия и серы, а также количество  $C_3A$  в исходном портландцементе должны учитываться при первоначальном назначении вещественного состава расширяющегося или напрягающего цемента и уточняться экспериментально. В качестве критерия эффективности той или иной расширяющейся добавки, расширяющегося цемента или бетона на их основе целесообразно использовать показатель деформаций. Величина показателя деформаций  $\epsilon_s/\epsilon_y$ , не должна превышать рекомендованных выше значений, обеспечивающих наибольшую морозостойкость и прирост прочности бетона.

#### Литература

1. Михайлов В.В., Литвер С.Л. Расширяющийся и напрягающий цементы и самонапряженные железобетонные конструкции. - М.: Стройиздат. 1974.- 312с.
2. Бейлина М.И. Напрягающий цемент на основе сульфаломиноатного клинкера. // Исследование и применение напрягающего бетона и самонапряженных железобетонных конструкций. - М.: Стройиздат, 1984.- с.15-22.
3. Кузнецова Т.В. Химия и технология расширяющихся цементов. - Москва.: ВНИИ-ЭСМ. Серия I. Цементная промышленность. 1980.-60с.
4. Панченко А.И. Долговечность бетона на расширяющемся цементе. // 75 лет расширяющемуся цементу. - Веймар, Германия. 1995.- с.119-129.
5. Panchenko A.I. Control of Expansion and Structure Formation of Expansive Cement. // Cement and Concrete Research, vol.20, 1990.- pp 602-609.