

УДК 666.972.1

СНИЖЕНИЕ ЗАТРАТ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

*канд. техн. наук, доц. О.В. ЛАЗАРЕНКО
(Полоцкий государственный университет)*

Рассматриваются способы увеличения прочности бетона: введение супер- и гиперпластификаторов в бетонные смеси; повышение расхода цемента, использование других вяжущих. Использование для бетона на доломитовом заполнителе других вяжущих, отличающихся минералогическим составом от портландцемента, связано с внутренней коррозией бетона. Использование в качестве вяжущего каустического доломита повышает прочностные свойства цементного камня и бетона в целом за счет отсутствия внутренней коррозии. Показано, что добавки наибольший эффект дают при наборе отпускной прочности. Исследуется возможность снижения стоимости железобетона за счет уменьшения затрат на сырьевые компоненты, используя для получения крупного заполнителя, занимающего до 50 % объема, более дешевую горную породу доломита. Приведены результаты исследований для решения поставленной задачи.

В настоящее время в Республике Беларусь основным материалом при изготовлении несущих конструкций для жилых, общественных и промышленных зданий является железобетон. В связи с этим снижение затрат на производство железобетонных конструкций (сырьевых, энергетических, трудовых) – одна из основных задач, которая ставится перед учеными и производителями. Тяжелый бетон – ресурсоемкий продукт промышленности строительных материалов, на производство которого необходимы миллионы тонн цемента, песка, щебня. При этом доля заполнителей в общих затратах на производство бетона составляет около 70 %. Запасы самого крупного гранитного карьера республики «Микашевичи», стоимость которого за 1 тонну составляет около 21 тыс. руб., не смогут в ближайшем будущем удовлетворять потребности отрасли строительных материалов. В то же время имеются практически неисчерпаемые запасы доломита карьера «Гралево» (г.п. Руба, Витебская обл.) стоимостью около 11 тыс. руб. за тонну.

Основная часть. Прочность на сжатие является основной характеристикой бетона. Во многих случаях именно она определяет несущую способность конструкций, поэтому ее исследование имеет первоочередное значение.

Рассмотрим **способы увеличения прочности бетона:**

1) *введение супер- и гиперпластификаторов в бетонные смеси.* Суперпластификаторы – длинноцепочные полимеры с большим количеством полярных групп в цепи. Высокая адгезия на зернах цемента обеспечивается за счет длинной углеводородной цепи и большой молекулярной массы. Суперпластификаторы позволяют увеличивать подвижность бетонной смеси без увеличения водосодержания либо минимизировать водоцементное отношение (В/Ц), приближая его к оптимальному, что дает 20...50 % прироста прочности. Главный недостаток суперпластификаторов – низкая жизнеспособность бетонной смеси – пластифицирующий эффект через 30...40 мин значительно снижается [1]. Гиперпластификаторы – карбоцепные полимеры лишены этого недостатка. Кроме того, используя данные модификаторы, можно получать высокопрочные бетоны классов до С70/85;

2) *повышение расхода цемента, использование других вяжущих.* Безусловно, повышение расхода вяжущего повысит прочность цементного камня. Так, при расходе цемента 580 кг на 1 м³ с использованием в качестве крупного заполнителя доломитового щебня, прочность бетона составила 50 МПа [2], однако увеличение расхода цемента приводит к существенному удорожанию бетона, кроме того необходимо учитывать наметившийся в республике дефицит цемента и вводимые в связи с этим ограничения по расходу цемента для заводов-производителей бетона и железобетона [3].

Изучение возможности использования для бетона на доломитовом заполнителе других вяжущих, отличающихся минералогическим составом от портландцемента, связано с внутренней коррозией бетона – реакционной способностью доломита к растворам солей щелочных металлов и щелочам цемента.

Многие исследователи отмечают, что между доломитовым щебнем и растворами солей щелочных металлов (например, 3 % NaCl) возможна реакция, связанная с переходом твердого карбоната кальция в раствор, т.е. раствор обладает агрессивными свойствами по отношению к цементному камню, приводящими к деформациям набухания [4]. Щелочи цемента могут реагировать с основным минералом доломита CaMg(CO₃)₂, в результате происходит ослабление структуры цементного камня за счет расширения твердой фазы [5]. При этом надо учитывать, что в цементном камне всегда присутствует гидроксид кальция, который, реагируя с образовавшимся карбонатом натрия, будет возобновлять содержание в растворе NaOH. Однако те же авторы [5] отмечают, что минералы доломита не всегда реакционноспособны, это зависит от месторождения горной породы: уровня залегания, обводнения, и выделяют основные месторождения, обладающие такими свойствами, в районе Дальнего Востока России, а также Средней Азии.

В связи с этим можно предположить, что использование в качестве вяжущего в бетон на доломитовом щебне каустического доломита [6] повысило бы прочностные свойства цементного камня и бетона в целом за счет отсутствия внутренней коррозии.

Затворяют каустический доломит растворами солей электролитов типа $MgCl_2 \cdot H_2O$, а для регулирования водостойкости бетона также вводят модификаторы – соли борной и фосфатной кислоты. Вяжущее предназначено для получения бетонов с прочностью до 60...80 МПа и более, морозостойкостью не ниже F100, водонепроницаемостью W10. Аналогичное вяжущее предполагается получать в Беларуси на основе месторождения доломита «Гралево» [3].

К факторам, влияющим на эксплуатационные свойства бетона, относится коррозионная стойкость заполнителя к воздействиям внешней среды. В этом плане существенное значение имеет химическая стойкость доломитового щебня.

Установлено, что там, где стойкость бетона определяется химическим взаимодействием среды и бетона и где агрессивная среда нейтральна или имеет щелочной характер, заполнители из карбонатных пород можно использовать наравне с заполнителями из изверженных пород [7].

В условиях действия кислых газов или жидкостей карбонатные породы могут разрушаться. При действии кислот на бетон с заполнителем из доломита коррозии будет подвергаться вся площадь заполнителя, и если при этом кальциевые соли кислоты растворимы, разрушение заполнителя может опережать разрушение цементного камня, на котором при действии кислоты остается слой продуктов коррозии. При малых концентрациях агрессивного компонента, разрушение бетона на карбонатных заполнителях может замедляться, поскольку в этом случае интенсивность разрушения определяется «реакционной емкостью» агрессивного раствора.

Карбонатные породы заполнителей способны разрушаться под действием неорганических кислот (за исключением уголекислоты): соляной, серной, азотной. Поэтому применение карбонатных заполнителей в кислой свободной поступающей среде исключено.

Коррозия бетона может возникать из-за взаимодействия активного кремнезема заполнителя со щелочами цемента. Содержание окислов Na_2O , K_2O в цементе невелико, не более 2 %, кроме того эти же окислы содержатся в небольшом количестве (до 0,18 %) в доломите, однако скорость их растворения превышает скорость растворения силикатов, алюминатов и ферритов. Поэтому растворение составных частей цемента происходит в растворах щелочей со сравнительно высокой концентрацией. При этом одноименный ион OH^- снижает растворимость гидроксида кальция, но повышает растворимость аморфного SiO_2 . Возникает коррозионный процесс – образование геля в зоне контакта цементного камня и заполнителя, приводящий к развитию трещин.

Учитывая, что в доломите карьера «Гралева» содержится в среднем 1,65 % активного кремнезема, необходимо исследовать соотношение щелочи к кремнезему для выявления опасности предела этого соотношения. Однако, учитывая, что наиболее интенсивно коррозионный процесс протекает при среднем диаметре зерен кремнезема (обладающих потенциальной реакционной способностью) – 0,2 мм, можно предположить, что присутствие кремнезема в доломите на коррозию бетона существенного влияния не окажет.

Прочность бетона зависит от прочности сцепления цементного камня с крупным заполнителем. Параметры кристаллической решетки гидросиликатов цементного камня и карбонатов кальция доломита примерно равны [8]. Это явление – эпитаксия – обеспечивает образование в контактной зоне соединений, которые имеют общие параметры кристаллической решетки цементного камня и минералов доломита. Таким образом, у карбонатных пород более прочное сцепление с цементным камнем, чем у гранитных.

Упругие деформации бетона под нагрузкой определяются модулем упругости. Следует учитывать, что усадка цементного камня при твердении вызывает обжатие зерен заполнителя и их деформацию, обратнопорпорциональную модулю упругости.

Чем выше модуль упругости заполнителя, тем выше усадочные напряжения цементного камня. Поэтому с точки зрения внутренних усадочных напряжений низко модульные заполнители более предпочтительны, чем высоко модульные. По данным [9] модуль упругости гранита составляет $4,3 \cdot 10^4$ МПа, доломита – $4,8 \cdot 10^4$ МПа. На наш взгляд, незначительная разница в модулях упругости гранита и доломита позволяет сделать вывод о том, что влияние данных заполнителей на величину относительной деформации бетона примерно одинаковое.

Важным фактором, оказывающим влияние на структуру цементного камня, является водоцементное отношение и, соответственно, прочность бетона, а также удельное содержание цемента.

Наибольшее применение в практике строительства имеют бетоны средних классов С16/20...С30/37. В этой связи для экспериментальных исследований были запроектированы бетоны с прочностью $f_{c,cube}^G$ от 20 до 37 МПа. Поскольку суперпластификаторы практически не чувствительны к минералогическому составу клинкера и минеральным добавкам (за исключением клинкера с содержанием C_3A более 7 %), использовали портландцемент ПЦ 500-Д0 производства ПРУП «Кричевцементосифер». В качестве крупного заполнителя применяли гранитный щебень карьера «Микашевичи» ОАО «Гранит» и доломит

товый щебень карьера «Гралево» ОАО «Доломит» с максимальной крупностью зерен 20 мм. Физико-механические характеристики заполнителей приведены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики щебня

Наименование показателей	Вид щебня	
	гранитный	доломитовый
Истинная плотность, кг/м ³	2700	2643
Насыпная плотность, кг/м ³	1450	1300
Марка по дробимости	1200	600
Содержание зерен пластинчатых и игловатых, %	22	33
Водопоглощение, %	0,44	2,3
Содержание зерен слабых пород, %	2,0	9,3
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	1,0	3,0
Содержание радионуклидов, А _{эфф} , Б _{к/кг}	98	54,8

К суперпластификаторам, разрешенным к применению в Беларуси и странах СНГ, относятся: С-3; Дофен; 10-03; МФ-АР; 40-03; СМФ. Однако емкость рынка республики по суперпластификаторам бетона находится на уровне 5...6 тыс. т в год и закрывается в основном поставками из России суперпластификатора С-3, частично потребность пополняется за счет нерегулярного производства добавки С-3 на СЖБ № 12, г. Мозырь. Исходя из этого нами для регулирования прочности растворной части бетона выбрана добавка суперпластификатор С-3 как наиболее широко используемая на территории Республики Беларусь. В качестве второй добавки использован суперпластификатор СПАС, получаемый сульфированием алкилбензолов С₁₀₊ и смолы пиролизной тяжелой, не уступающий по эффекту воздействия на цементные системы суперпластификатору С-3, но имеющий ряд преимуществ в части отсутствия расслоения бетонной смеси, чувствительности к передозировкам, жизнеспособности бетонной смеси не менее 2-х часов. Кроме того, стоимость 1 кг добавки СПАС в 1,7 раза меньше стоимости добавки С-3.

Суперпластификатор СПАС прошел лабораторные испытания, получил положительный отзыв РУП «Институт БелНИИС», разработаны проекты технических условий на опытную партию.

Добавку С-3 вводили в количестве 0,7 % от массы цемента. С целью исследования влияния дозировки добавки СПАС на структуру и прочность цементного камня добавку вводили в количестве 1 и 1,2 % от массы цемента. Исходя из подвижности контрольного состава бетонной смеси на гранитном и доломитовом щебне – 1 см, нами установлено снижение расхода воды на 16...20 %.

Исследовались 5 составов бетона естественного твердения – маркировка Е, бетона с тепловлажностной обработкой (ТВО) – маркировка П.

Бетонные смеси, модифицированные суперпластификаторами, при их тепловлажностной обработке требуют определенных режимов, которые обеспечат отпускную прочность пропаренного бетона. Принимали мягкий режим ТВО: 3 + 3 + 6 + 2.

В соответствии с методикой испытаний изготовлены равноподвижные бетонные смеси, определены значения прочности, интегральной и дифференциальной пористости бетона (серии Е1...Е5, П1...П5) при естественном твердении и тепловлажностной обработке.

При определении подвижности бетонных смесей составов 2...5 наблюдалось ее снижение (осадка конуса менее 1 см) по сравнению с контрольным составом 1 (ОК = 1 см), из-за присутствия в доломитовом щебне пыли до 3 % и большей пористости зерен доломита (6,4 %) по сравнению с гранитными. Для устранения данного влияния и повышения эффекта действия добавок приняли следующую последовательность перемешивания компонентов бетонной смеси:

- для бетона на гранитном щебне загружали песок и цемент; тщательно перемешивали до получения однородной массы, затем добавляли щебень, перемешивали до равномерного распределения компонентов смеси, вводили воду;

- для бетона на доломитовом щебне без добавок вначале перемешивали заполнители, вводили воду, а затем цемент. В этом случае пылевидные примеси в доломитовом щебне смываются с его поверхности и более равномерно распределяются в цементном тесте;

- для бетона на доломитовом щебне с добавками вначале перемешивали компоненты смеси: заполнители и цемент, затем вводили ½ часть воды затворения, перемешивали смесь и вводили вторую часть воды с добавками. При этом первая порция воды заполняет мелкие поры и капилляры щебня, препятствуя адсорбции добавки на поверхности зерен и обеспечивая более эффективное действие добавок относительно зерен цемента.

Следует отметить, что при приготовлении бетонной смеси состава 5 с добавкой С-3 наблюдалось водоотделение и расслоение смеси.

Экспериментальные данные по испытанию бетона на прочность приведены в таблицах 2, 3; значения интегральной и дифференциальной пористости – на рисунках 1, 2.

Таблица 2

Прочность бетона естественного твердения

Шифр состава	Средняя плотность бетона, кг/м ³ , в возрасте		Прочность бетона на осевое сжатие, МПа, в возрасте	
	7 суток	28 суток	7 суток	28 суток
Е 1	2420,4	2384,7	25,13	30,27
Е 2	2379,1	2356,4	17,86	25,31
Е 3	2356,5	2328,3	34,82	39,99
Е 4	2271	2245,4	32,6	36,51
Е 5	2351,8	2324	30,23	33,86

Таблица 3

Прочность бетона после тепловлажностной обработки

Шифр состава	Средняя плотность бетона, кг/м ³ , через		Прочность бетона на осевое сжатие, МПа, через	
	1 сутки	27 суток	1 сутки	27 суток
П 1	2394	2387,5	16,65	21,31
П 2	2385	2372,5	18,38	23,19
П 3	2301,8	2275,8	31,69	41,19
П 4	2250,7	2211	28,5	36,43
П 5	2311,7	2287,5	26,5	34,3

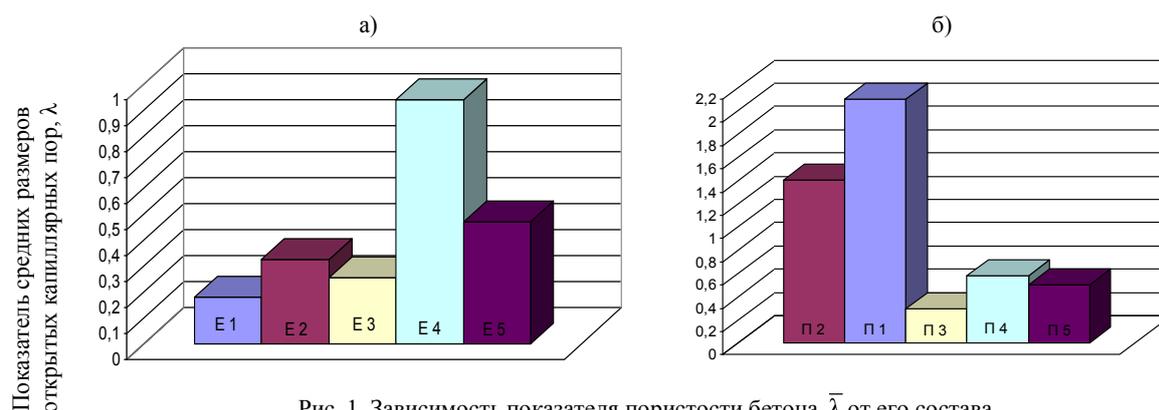


Рис. 1. Зависимость показателя пористости бетона $\bar{\lambda}$ от его состава
а – естественное твердение бетона; б – тепловлажностная обработка бетона;
Е1...Е5, П1...П5 – шифры состава бетона

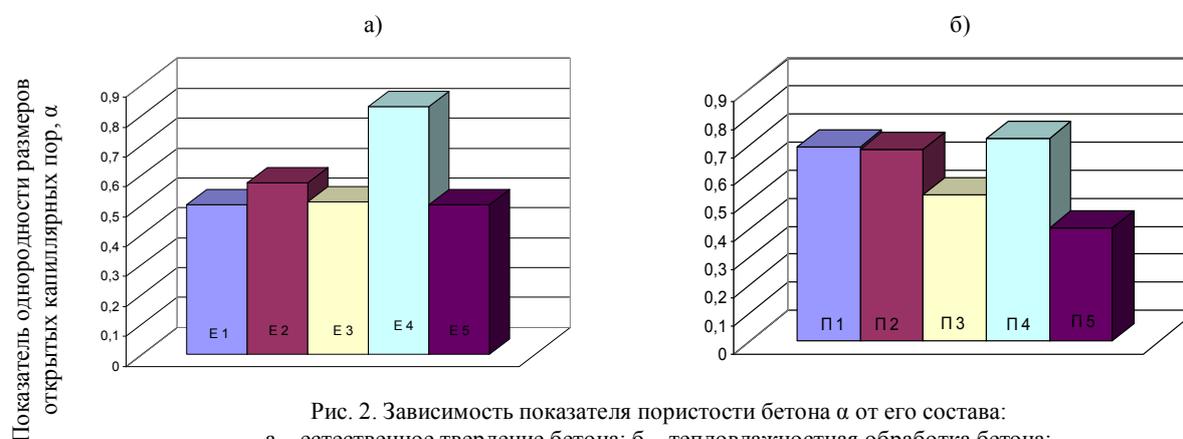


Рис. 2. Зависимость показателя пористости бетона α от его состава:
а – естественное твердение бетона; б – тепловлажностная обработка бетона;
Е1...Е5, П1...П5 шифры состава бетона

Анализ полученных показателей (табл. 2 – 4) проводили совместно, учитывая, что на прочность бетона оказывают влияние свойства цементного камня и заполнителя.

Из рисунков 1, 2 (состав Е1...5, П1...5) можно сделать следующие выводы:

- увеличение водопоглощения и открытой пористости состава 2 по сравнению с 1 обусловлено тем, что на поверхности доломитового щебня содержится больше воздуха, так его адсорбционная способность выше, чем гранитного. Такая картина наблюдается у составов Е1, 2, П1, 2;

- для всех составов на доломитовом щебне уплотнение цементного камня за счет снижения расхода воды затворения повлияло на интегральную пористость составов 3...5 по сравнению с составом 2;

- уменьшение интегральной пористости состава 4 (1,2 % СПАС) по сравнению с составом 3 (1 % СПАС) вызвано тем, что увеличение процентного содержания добавки снижает поверхностное натяжение воды и, как следствие, увеличивает отсос воды заполнителем, при этом цементный камень в центральной части прослойки имеет пониженное В/Ц, что приводит к его дополнительному уплотнению. Однако у состава 4 повышенное значение условного среднего размера открытых пор, это объясняется тем, что добавка СПАС обладает свойством воздухововлечения, которое растет с увеличением процента ввода добавки. Это же явление подтверждает и пониженное значение средней плотности бетона (состав Е4, П4), а также снижение прочности состава 4 по сравнению с 3;

- увеличение интегральной пористости состава 5 (0,7 % С-3) по сравнению с составами 3 и 4 произошло в связи с тем, что при приготовлении бетонной смеси добавка вызвала водоотделение, что привело к образованию седиментационных пор, имеющих, как правило, вид направленных сообщающихся капиллярных пор, это же явление вызвало снижение прочности состава 5.

Рассматривая значения средней плотности бетона естественного твердения и после тепловлажностной обработки, отметим, что плотность бетона составов 3, 4, 5 отличается от плотности контрольного состава 2, что свидетельствует о воздухововлечении добавок, причем для добавки СПАС эффект воздухововлечения растет с увеличением процента ввода добавки с 1 до 1,2 %.

Анализируя плотность бетона состава Е3, Е5, П3, П5, можно сделать вывод: эффект воздухововлечения добавок СПАС (1 % ввода) и С-3 (0,7 % ввода) примерно одинаков.

Анализируя данные таблиц 2, 3, можно сделать вывод, что снижение водопотребности на 16...20 % в составах 3...5 позволило увеличить прочность бетона на доломитовом щебне на 25...36 % по сравнению с бездобавочным составом 2 во все сроки твердения.

Наибольшее увеличение прочности бетона (36,7 %) наблюдается при содержании добавки СПАС 1 % от массы цемента.

Сравнивая относительный прирост прочности бетона через 1 сутки после ТВО и через 27 суток (см. табл. 3), можно сделать вывод, что добавки наибольший эффект дают при наборе отпускной прочности. Это объясняется тем, что введение суперпластификатора в бетонную смесь приводит к образованию адсорбционного слоя на поверхности гидратирующих цементных частиц, что и замедляет гидратацию и структурообразование. Однако адсорбционный слой добавки проницаем для воды, поэтому после первоначального замедления скорость гидратации увеличивается. Чем меньше воды в системе, тем быстрее начинается процесс роста скорости гидратации. Кроме того, обе добавки содержат Na_2SO_4 , который ускоряет процесс структурообразования.

Низкое значение прочности контрольного состава бетона П1 (см. табл. 3) на гранитном щебне после тепловлажностной обработки обусловлено наличием свободной воды в системе, которая при выбранном мягком режиме ТВО постоянно в ней присутствует, расширяется, приводя к формированию пористой структуры цементного камня, что подтверждает значение $\bar{\lambda} = 2,1$ для данного состава (см. рис. 1, 2). Прочность состава П2 на доломитовом щебне выше прочности состава П1.

Причина в разнице прочности может быть следующей: на поверхности заполнителя проявляется адсорбция воды, входящей в состав цементного теста, которая зависит от свойств заполнителя: влагоемкости, лиофильности и водопотребности. Зерна доломита, являясь более пористыми по сравнению с гранитными (более чем в 10 раз), удерживают воду, обеспечивая самоуплотнение цементного камня, а следовательно повышая прочность бетона. Тем не менее в системе присутствует свободная вода, о чем свидетельствует показатель $\bar{\lambda}$, равный 1,46.

Как отмечалось ранее, адсорбционная способность доломитового щебня не только снижает фактическое В/Ц, но и улучшает его сцепление с цементным камнем, что подтверждает характер разрушения бетона, представленный на рисунках 3 – 5.

Для бетона на гранитном щебне (см. рис. 3) сцепление с цементным камнем таково, что разрушение бетона происходит в контактной зоне цементный камень – заполнитель, при этом прочность самого щебня недоиспользуется.



Рис. 3. Разрушение бетона на гранитном щебне (состав Е 1):
1 – цементный камень; 2 – зерно гранитного щебня

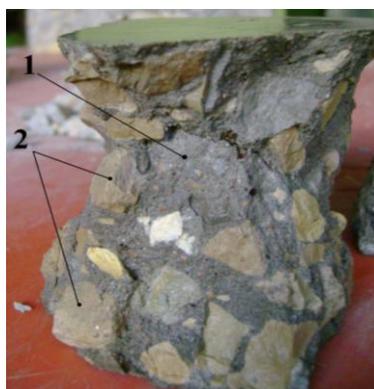


Рис. 4. Разрушение бетона на доломитовом щебне (состав Е 2):
1 – цементный камень; 2 – целые зерна доломита



Рис. 5. Разрушение бетона на доломитовом щебне (состав Е 1)
1 – цементный камень; 2 – разрушенные зерна доломитового щебня

При использовании доломитового щебня без добавок (см. рис. 4), разрушение частично происходит по контактному слою и в отдельных зернах заполнителя.

Для бетона составов 3...5 разрушение происходит по сквозным трещинам как в цементном камне, так и в доломитовом щебне (см. рис. 5).

В заключение можно сделать следующие **выводы**:

1. В настоящее время в качестве крупного заполнителя для бетонов средних классов используют гранитный щебень, прочность которого в бетонах полностью не используется, кроме того запасы гранитного щебня в Республике Беларусь в ближайшем будущем не смогут обеспечить все возрастающие объемы производства бетона. В то же время в Витебской области имеются практически неисчерпаемые

запасы доломита, при этом стоимость доломитового щебня примерно в 2 раза ниже стоимости гранитного, однако широкого применения доломитовый щебень в республике не нашел.

2. Более эффективной добавкой-суперпластификатором для модификации бетона по сравнению с наиболее применимой С-3 является новая добавка СПАС, для которой определен оптимальный ввод в количестве 1 % от массы цемента, при этом прирост прочности бетона на доломитовом щебне в 1,5 и 1,3 раза больше по сравнению соответственно с бездобавочным на доломитовом и гранитном щебне при естественном твердении и тепловлажностной обработке.

3. Показатель среднего размера открытых капиллярных пор имеет минимальные значения λ при модификации бетона суперпластификатором СПАС. При увеличении ввода добавки с 1 до 1,2 %, λ увеличивается в 1,6...3,5 раза за счет интенсивного воздухоовлечения.

4. Несмотря на низкую активность используемого цемента (42,3 МПа) можно получать модифицированные бетоны на доломитовом щебне не ниже класса С30/37.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калмыков, Л.Ф. Литьевая технология бетонирования монолитных конструкций / Л.Ф. Калмыков. – Минск: БелНИИТИ, 1989. – 72 с.
2. Рыскин, М.Н. Структурно-механические свойства и технология высокопрочного бетона: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / М.Н. Рыскин. – Минск, 2002. – 20 с.
3. Химизация бетона – новый этап в технологии строительства: интервью с Н.П. Блещиком [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ais.by>.
4. Ферронская, А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона / А.В. Ферронская. – М.: Изд-во АСВ, 2006. – 336 с.
5. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С.Н. Алексеев [и др.]. – М., 1990. – 316 с.
6. Высококачественный магнезиальный бетон на каустическом доломите / В.А. Смирнов [и др.] // Бетон на рубеже третьего тысячелетия: материалы 1-й Всерос. конф. по проблемам бетона и железобетона, Москва, 9 – 14 сент. 2001 г.: в 3 кн. – М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. – Кн. 2. – С. 1049 – 1057.
7. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / В.В. Бабков [и др.]. – Уфа, 2002. – 373 с.
8. Гордон, С.С. Структура бетона и его прочность с учетом роли заполнителей / С.С. Гордон. – М., 1966. – 286 с.
9. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под общ. ред. Н.В. Мельникова. – М.: Недра, 1975. – 276 с.
10. Добавка для бетонных смесей / Ф.М. Иванов [и др.] // Бетон и железобетон. – № 10. – 1978. – С. 11 – 17.

Поступила 03.06.2009