

УДК 666. 972. 16

Шургая А.Г. нач. лаб. МО №112, г. Бровары,
Гудименко К.В. ассистент НТУ, г. Киев,
Чиженко Н.П. ассистент НТУ, г. Киев
e-mail: chyzhenko_np@ukr.net

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УЛУЧШЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ
ЦЕМЕНТОБЕТОНОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Показано, что при решении проблемы повышения долговечности цемента-бетона следует учесть взаимосвязь свойств исходных материалов, состава бетон-ной смеси, структуры и свойств бетона, технологических, эксплуатационных фак-торов и природно-климатических воздействий. В связи с этим проблема повыше-ния долговечности цементобетонных покрытий носит комплексный характер, включающий конструктивные, материаловедческие и технологические аспекты.

Ключевые слова: высокопрочный дорожный цементобетон, долговечность, оптимальность структуры, пористость, морозостойкость, комплексные добавки.

Дорожный бетон на крупном и мелком заполнителе относится к категории обычных тяжелых бетонов с плотной структурой в котором все пространство между зернами заполнителя заполнено цементным камнем и вовлеченным воздухом.

В зависимости от концентрации крупного заполнителя дорожные бетоны подразделяются на пять структурных типов (табл. 1).

Таблица 1

Структурный тип бетона	Характеристика структурного типа	Абсолютный объем щебня $C_{щ}$, м ³ /м ³	Содержание крупного заполнителя в 1 м ³ бетона, кг	K_p	средний расчетный размер межзерновых прослоек	
					цементного камня, мкм	раствора, мм
I	Особо крупнозернистый	0,42...0,52	1150...1400	< 1,7	> 80	< 2,5
II	Крупнозернистый	0,4...0,42	1050...1150	1,7...1,9	60...80	2,5...3,0
III	Крупнозернистый малощебеночный	0,2...0,4	550...1050	2...3	50...60	3,0...5,0
IV	Особо малощебеночный	0,1...0,2	250...550	3...4 и более	45...50	5,0...6,0 и более
V	Мелкозернистый	—	—	—	40...45	—

Преждевременный капитальный ремонт цементобетонных покрытий обусловлен в большинстве случаев поверхностными разрушениями и хаотическим трещинообразованием различной интенсивности. Одной из важнейших причин такого разрушения является формирование недостаточно морозостойкой и прочной структуры бетона.

При решении проблемы повышения долговечности цементобетона учитывают взаимосвязь свойств исходных материалов, состава бетонной смеси, структуры и свойств бетона, технологических факторов, эксплуатационных и природно-климатических воздействий. В связи с этим проблема повышения долговечности цементобетонных покрытий носит комплексный характер, включающий

конструктивные, материаловедческие и технологические аспекты.

Для повышения долговечности покрытий наиболее целесообразно применять высокопрочные дорожные бетоны. При одной и той же толщине плиты применение высокопрочных бетонов позволит снизить уровень напряжений от температурных деформаций и суммарного воздействия транспортных нагрузок и существенно повысить срок службы цементобетонного покрытия.

Оптимизация бетонной смеси: модуль упругости гранитного щебня $70 - 90 \cdot 10^3$ МПа, а растворной части $15 - 26 \cdot 10^3$ МПа. По многолетней практики и материаловедения в СССР и за границы и Украины модуль упругости бетонов дорожного и мостового строительства должен составлять $37 - 42 \cdot 10^3$ МПа (при 5 – 6 % вовлеченного воздуха). Выходя из этого нужно ограничить количество щебня от 1050 – 1250 кг и соотношение между мелким и крупным заполнителем (r). При мелком песке $M_{кр} \geq 1,8$ $r = 0,35 - 0,37$, при среднем песке $M_{кр} \geq 1,8 - 2,1$ $r = 0,37 - 0,4$, при крупном песке $M_{кр} \geq 2,2$ $r = 0,4 - 0,45$

Высокопрочный дорожный бетон можно рассматривать как бетон, прочность которого равна или выше чем активность цемента $R_{\sigma} \geq R_u$.

С учетом сказанного под высокопрочным дорожным бетоном понимается бетон, прочность которого на растяжение при изгибе более 5,5 МПа (класс по прочности на растяжение при изгибе более чем B_{b1b} 4,4 МПа).

Проектирование состава высокопрочного дорожного бетона выполняется в соответствии с методологией, аналогичной для дорожного бетона обычной прочности.

При подборе состава высокопрочного бетона при одинаковой марке цемента М500 решающее значение имеет R_u^c (марка цемента на растяжение при изгибе $R_u^c \geq 6,0$ МПа).

При проектировании состава бетона нужно учитывать, что высокопрочные дорожные бетоны могут быть получены за счет повышения прочности цементного камня.

Для получения высокопрочного дорожного бетона необходимо:

- высокоактивные (по изгибу $R_u^c \geq 6,0$ МПа) цементы;
- уменьшение $B/C \leq 0,37$;
- применение эффективных компонентов суперпластификаторов с воздухововлекающим или газообразующими добавками с водоредуцированием более 25 %;
- максимально повышением (κ_p) коэффициента раздвижки;
- оптимальное соотношение между мелким и крупным заполнителем (r).

Ориентировочное значение B/C для получения среднего уровня прочности бетона определяют по следующей формуле:

$$B / C = \frac{0,34 R_u}{R_{\sigma} + 0,034 R_u}, \quad (1)$$

где: R_u – предел прочности цемента при изгибе, определяемый экспериментально (ГОСТ 310.4.81);

R_{σ} – средний уровень прочности при растяжении при изгибе бетона $R_{\sigma} \geq 5,5$ МПа.

Средний объем вовлеченного воздуха для расчета принимается 50 л/м³.

Определение количества крупного заполнителя (щебня) определяется по формуле:

$$Щ = \frac{1000}{\frac{\kappa_p \cdot V_{пщ}}{\gamma_0^{щ}} + \frac{1}{\gamma^{щ}}}, \quad (2)$$

где: κ_p – коэффициент раздвижки;

$\gamma_0^{\text{щ}}$ – насыпная плотность щебня, кг/м³;

$\gamma^{\text{щ}}$ – истинная плотность щебня, кг/м³.

При применении мелкого песка $M_{\text{кр}} = 1,3 - 1,8$ желательно добавить гранотсев в количестве 25 – 50 % от общего количества мелкого заполнителя.

Высокопрочные бетоны на суперпластификаторах с воздухововлечением при правильном подборе состава при $Ц/В > 2,7$.

При определении количества воды после определения количества щебня, нами предложено применять формулу[1]:

$$B = \frac{K_{\text{н.г.}} \cdot Ц \cdot H_{\text{г}} + B_{\text{п}} \cdot \gamma^{\text{п}} (V_{\text{р}} - Ц / \gamma^{\text{п}}) + B_{\text{щ}}}{1 + 0,001 B_{\text{п}} \cdot \gamma^{\text{п}}}, \quad (3)$$

где: $Ц$ – количество цемента, кг;

$H_{\text{г}}$ – нормальная густота цементного теста;

$B_{\text{п}}$ – водопотребность песка, л (определяются по методу Баженова при составе цементно-песчаного раствора $Ц:П = 1:1$);

$B_{\text{щ}}$ – водопотребность щебня, л;

$\gamma^{\text{п}}$ – истинная плотность песка, кг/м³;

$K_{\text{н.г.}}$ – экспериментальный коэффициент.

Потребность воды на смачивание поверхности зерен щебня определяется по предлагаемой формуле:

$$B_{\text{щ}} = 0,008 \cdot Ш_{5-10} + 0,005 \cdot Ш_{10-20} + 0,003 \cdot Ш_{20-40}, \quad (4)$$

где: $Ш_{5-10}$, $Ш_{10-20}$, $Ш_{20-40}$ – весовой расход щебня соответственно фр. 5-10 мм, фр.10-20 мм, фр.20-40 мм на 1 м³ виброуплотненного бетона, кг.

$$K_{\text{щ}} = \frac{Ц}{\gamma_{\text{с}}^{\text{щ}}}, \quad (5)$$

где $\gamma_{\text{с}}^{\text{щ}}$ – плотность щебня в вибрированном состоянии, кг/м³.

Объем растворной части определяется по формуле:

$$V_{\text{р}} = k_{\text{щ}} \cdot V_{\text{с}}^{\text{щ}} + (1 - k_{\text{щ}} - V_{\text{с}}), \quad (6)$$

где: $V_{\text{с}}$ – содержание воздуха в бетоне;

$$V_{\text{с}}^{\text{щ}} \text{ – пустотность щебня в вибрированном состоянии } V_{\text{с}}^{\text{щ}} = \frac{\gamma^{\text{щ}} - \gamma_0^{\text{щ}}}{\gamma^{\text{щ}}}.$$

При $V_{\text{с}} = 0$, $V_{\text{с}} = 1000 \text{ л}$, тогда выражение (6) имеет вид $V_{\text{р}} = k_{\text{щ}} \cdot V_{\text{с}}^{\text{щ}} + (1 - k_{\text{щ}})$.

Содержание песка вычисляется по формуле:

$$П = (V_{\text{р}} - \frac{Ц}{\gamma^{\text{п}}} - \frac{B - B_{\text{щ}}}{1000}) \cdot \gamma^{\text{п}}. \quad (7)$$

При применении химической добавки содержание воды:

$$B = \frac{K_{н.г.} \cdot k_{\delta}^2 \cdot \Pi \cdot H_r + B_n \cdot \gamma^n (V_p^1 - \Pi / \gamma^4) + B_{ш}}{1 + 0,001 B_n \cdot \gamma^n}, \quad (8)$$

где: $k_{\delta} = \frac{H_r^1}{H_r}$ – коэффициент эффективности добавки;

H_r^1 – нормальная плотность цементного теста с применением химической добавки;

H_r – нормальная плотность цементного теста.

Наиболее простой способ определения установления соотношения между мелким (Π) и крупным (Π) заполнителем $r = \frac{\Pi}{\Pi + \Pi}$.

Более удачное использование коэффициента раздвижки зерен (κ_p) по Б.Скрамтаеву и Ю.М. Баженову) κ_p заранее определено статически-пустотного крупного заполнителя (Π) и объемом связующего (цементный камень).

При определении κ_p – основной фактор реологических свойств бетонной смеси.

Теоретические модели (Д.И. Штаерман, Н.П. Блошин и др.) формирования пустотности заполнителей рассматривается в их уплотненном состоянии.

С таким подходом можно согласиться если б не было раздвижки между зернами, учитывался размер, условный диаметр зерен, лещадность и сечение конструкции.

“Оптимальность структуры” подбора состава бетонной смеси (κ_p , r , Π и т.д.) должны определяться не только минимальной пустотностью смеси заполнителей и объемом связующего – но и требуемыми технологическими свойствами, а также экономической целесообразностью с применением отходов производства (например отсева).

Поровая структура цементного камня и бетона

Поровая структура (пористость) связана с содержанием воды и цемента, значением В/Ц, степени гидратации цемента и других факторов.

Вода в затвердевшем бетоне по форме связана с поверхностью твердой фазы подразделяют на химическую, физико-химическую и физико-механическую.

Химически связанная вода до 105 °С относится к неиспаряемой, а физико-химическая и физико-механическая при температуре сушки 105 °С удаляется и считается испаряемой.

С учетом формы воды с поверхностью твердой фазы цементного камня в нем можно выделить три группы пор: гелевые, контракционные и капиллярные.

Размер пор геля до $5 \cdot 10^{-3}$ мкм и не замерзают при отрицательной температуре. Объем пор геля % может определить по формуле Г.И. Горчакова:

$$\Pi_z = \frac{0,2 \cdot \alpha \cdot \Pi}{10}, \quad (9)$$

где: α – степень гидратации $\alpha = 0,5+0,6$.

Капиллярные поры 0,005 + 0,1 мкм по существу субмикрокапиллярные и процессы капиллярной фильтрации в них замедлены (диффузионно-проницаемые поры).

Наиболее опасными бывают капиллярные поры с размером > 0,1 мкм. Такие структуры относятся к “проницаемым” и в них вода замерзает.

Капиллярная пористость цементного камня в бетоне определяется по формуле Г.И. Горчакова:

$$\Pi_{\kappa} = \frac{B - 0,5 \cdot \alpha \cdot C}{10}, \quad (10)$$

где B – содержание воды, кг/л

Анализируя, зависимость (10) отражает объем воды переходящий в лед. При уменьшении количества воды в бетонной смеси, B/C , а также повышения степени гидратации цемента (α) положительно влияет на характер пористости с точки зрения морозостойкости бетона.

Контракционные поры (объем защемленного воздуха в капиллярах цементного камня) могут уменьшаться при водонасыщении при давлении воды и растворения - выдавливания воздуха. Контракционные поры $r \leq 1$ мкм – не обеспечивает резервное пространство необходимое для компенсации расширения воды при замерзании.

Объем контракционных пор % может быть определен по формуле Г.И. Горчакова:

$$\Pi_{\kappa\kappa} = \frac{0,09 \cdot \alpha \cdot C}{10}. \quad (11)$$

Основным фактором образования резервной воздушной фазы в бетоне является воздухововлекающие действия специальных химических добавок микропенообразователей – при приготовлении бетонной смеси.

Образующая поровая система относится к условно замкнутым порам т.е. не заполняются водой при обычных условиях.

Основной функцией этих пор является существенное увеличение морозостойкости бетона, особенно в условиях совместного действия низких температур и антигололедных реагентов. Указанные поры имеют преимущественно сферическую форму размером от 25,50 мкм до 200 – 300 мкм.

Для эффективной работы воздушные поры должны быть соответственным образом размещены в объеме бетона в межзерновых прослойках цементного камня наряду с зернами песка, что определяется так называемым “фактором расстояния”.

“Фактор расстояния” – является одним из критериев морозостойкости бетона.

Дефектом структуры могут быть:

- поры на контакте цементного камня и заполнителя, которые уменьшают площадь сцепления (взаимодействия) и отрицательно влияют на долговечность бетона;
- условно замкнутые поры – если они расположены на контакте цементного камня и заполнителя, нарушая сплошность контактной зоны.

Общий объем порового пространства также можно охарактеризовать такими показателями как истинная (суммарная) пористость, открытая (капиллярная) пористость и условно замкнутая.

Истинная пористость Π_u определяется на основании экспериментальных данных по плотности и средней плотности (объемной массой бетона):

$$\Pi_u = \frac{\gamma_{\beta}^T - \gamma_{\beta}^{\phi}}{\gamma_{\beta}^T} \cdot 100\% \text{ (поромер)}. \quad (12)$$

Условно замкнутые поры (суммарный объем пор не заполненный при водонасыщении) определяется:

$$\Pi_{\Sigma} = \Pi_{\kappa} - \Pi_{\kappa\kappa}, \quad (13)$$

Π_{κ} – открытая (иногда капиллярная) пористость (суммарный объем пор доступен для водонасыщения)

Коэффициент насыщения определяется:

$$K_{\text{нас}} = \frac{P_o}{P_{\text{и}}} . \quad (14)$$

Формирования микроструктуры цементного камня происходит в основном его объемом, так как и пограничных с поверхностью заполнителя слоях – микрообъемах – контактном слое. Контактный слой имеет значительно более прочную структуру чем основная структура, так называемый объем. Повышенная плотность объясняется увеличением дисперсности и уплотнения кристаллической структуры цементного камня из-за специфической роли поверхности кварца и родственных по своей физико-химической природе минералов гидратными новообразованиями так называемой “подложки”.

По Т.Ю. Любимовой кварц является наиболее активной подложкой при кристаллизационном твердении портландцемента, как в следствие кристаллохимического соответствия подложки и новообразований так как в следствие большой гидрофильности и большой поверхностной энергии кварца как твердой фазы.

По данным А.М. Шейнина – который изучал кинетику структурообразования цементного камня в дорожном бетоне на различном расстоянии от поверхности контакта с заполнителями по изменению микропрочности, которая характеризуется микротвердостью.

Контактный слой цементного камня шириной 10 – 30 мкм от 7 – 10 суток до 180 суток микропрочность цементного камня 2 – 2,5 раза и более превышает микропрочность в объеме. Степень упрочнения структуры цементного камня в “контактных слоях” в реальных структурах бетона различного возраста колеблется от 200 – 500 %. Эффективная ширина прослойки между заполнителями цементного камня оценивается величиной 10 – 20 мкм.

Изменением геометрий структуры бетона, т.е. размера межзерновых прослоек цементного камня, можно регулировать относительный объем “контактных слоев” цементного камня, а следовательно и степень его упрочнения в микрообъемах.

Характер распределения микротвердости в “прослойках” существенно зависит от расстояния между зернами заполнителя.

Возможны три характерных случая:

1. Расстояние между двумя зернами заполнителей (l) больше удвоенной эффективной толщины контактного слоя ($\delta_{\text{к.с.}}$) приблизительно равной 15 – 20 мкм т.е. $l > 2 \delta_{\text{к.с.}}$.

В этом случае структура и микротвердость прослойки цементного камня определяется его структурой в “объеме”.

2. Расстояние между двумя зернами заполнителя равно или меньше удвоенной “эффективной толщины контактного слоя” т.е. $l \leq 2 \delta_{\text{к.с.}}$.

В этом случае структура и микротвердость “прослойки” определяется структурой и микротвердостью в зоне пересечения двух “контактных слоев” и микротвердость больше чем в “объеме”.

3. Расстояние между двумя зернами заполнителя равно или меньше эффективной толщины “контактного слоя” т.е. $l \leq \delta_{\text{к.с.}}$ т.е. структура и микротвердость прослойки цементного камня практически соответствует максимальным характеристикам “контактного слоя”.

Таким образом, сближая зерна заполнителей, можно вызвать значительное упрочнение микрообъемов цементного камня в бетоне за счет взаимодействия слоев.

Особо надо отметить значение коэффициента $\alpha_{\text{ц.т.}}$ – отношение объема цементного теста к объему пустот в виброуплотненной смеси заполнителя определяется:

$$\alpha_{ц.т.} = \frac{\frac{Ц}{\gamma_{ц}} + B - B_{ц}}{\frac{Щ}{\gamma_{щ}} \cdot V_{с}^{щ} + \frac{П}{\gamma_{п}} \cdot V_{с}^{п}}, \quad (15)$$

где: $V_{с}^{п}$ – пустотность песка в вибрированном состоянии, кг/м³

По данным испытаний наилучшие результаты достигаются при $\alpha_{ц.т.} = 0,75 - 0,82$.

Для обеспечения высокой морозостойкости:

– уменьшение $< B/Ц$;

– уменьшение концентрации крупного заполнителя и увеличения межзерновых прослоек раствора – резервные воздушные пузырьки размещаются вне зоны контакта с крупным заполнителем и образуют структурные элементы разделенные перегородками из цементного камня.

Для обеспечения высокой морозостойкости, в том числе стойкости к шелушению, необходимо модифицировать макроструктуру дорожного бетона по принципу увеличения размера межзерновых прослоек растворной составляющей до рационально возможного значения в обычных и малощебеночных бетонах.

Целесообразно модифицировать макроструктуру дорожного бетона по принципу уменьшения размера прослоек цементного камня (около 30 мкм) минимальный размер которых (20 – 30 мкм) определяется необходимостью обеспечения непрерывности (сплошности) структуры и возможности размещения воздушных пузырьков, а максимальный размер двух контактных слоев (около 40 – 50 мкм) $r = 0,37 + 0,42$

Характер разрушения бетона при истирании определяется теми же факторами, которые определяют механизм разрушения при испытаниях на прочность.

Наиболее равномерно изнашивается крупнощебеночный бетон, что объясняется однородностью поверхностного слоя. Более неравномерно по площади истирание бетона происходит в покрытии из мелкозернистого бетона, что связано с геометрической неоднородности структуры.

Высокая истираемость (стойкость дорожного бетона 30 – 35 МПа подтверждена в работах СоюзДорНИИ и при увеличениях прочности на сжатие до 60 – 70 МПа истираемость дорожного бетона не снижается.

При повышении подвижности дорожного бетона было замечено повышения долговечности дорожного бетона (и нами тоже), что можно объяснить более эффективным формированием условно – замкнутых резервных пор в подвижных бетонных смесях в связи со специфическим действием воздухововлекающих добавок – микропенообразователей, а также повышением коэффициента раздвижки и следовательно с увеличением содержания песка.

Для повышения морозостойкости необходимо не только определенный интегральный объем воздуха но и определенный характер дифференциальной воздушной пористости, которая определяет удельную площадь поверхности воздушных пор и фактор расстояния между ними. Для дорожного бетона высокой гарантированной морозостойкости фактор расстояния не должен превышать 0,15 мм, а объем резервных пор $d \leq 300$ мкм должен быть не менее 5%.

По А.М. Шейнину фактическая морозостойкость (с учетом антигололедных реагентов) дорожного бетона гарантирование высокой морозостойкости должна быть существенно выше (ориентировочно в 2,5 – 3 раза от номинального (нормативного). Нормативные марки по морозостойкости должны использоваться только при подборе состава бетона, контроле его качества в процессе строительства и при приемки, а также при приемки цементобетонных покрытий в эксплуатацию.

Выводы:

Для обеспечения долговечности технологических параметром цементобетонной смеси

нужно учесть следующие факторы:

- использовать цементы высокой прочности при изгибе, желательно мокрого помола с учетом зарубежного опыта (России, Канады, США, Финляндии, Швеции);
- применять эффективные комплексы добавок суперпластификаторов и с воздухововлекающим эффектом; водоредуцирование более 25 %, живучестью бетонной смеси не менее 60 - 120 мин.;
- подбор оптимального состава цементобетонной смеси;
- уточнение формул подбора состава цементобетонной смеси;
- по экономической целесообразности применять отсев;
- оптимальное значение $\alpha_{ц.т.}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сканделидзе А.А. Новый способ рационального проектирования высокопрочных бетонов марок 500-1000. – Тбилиси, 1978.
2. Чистяков В.В., Шургая А.Г., Дорошенко Ю.М., Чиженко Н.П. Модифицированные цементобетоны для покрытия дорог // Строительные материалы, изделия и санитарная техника. – 2012. – Вып. №43. – С 212.
3. Файнер М.Ш. Высокопрочный бетон. – Черновцы, 2007.
4. ГОСТ 27006–86. Правила подбора состава.
5. Шейнин А.М. Цементобетон для дорожных и аэродромных покрытий. – М.: Транспорт, 1991. – 151 с.
6. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.

ТЕОРЕТИЧНІ І ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ПОЛІПШЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ, ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ І ДОВГОВІЧНОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ В ДОРОЖНЬОМУ БУДІВНИЦТВІ

Шургая А.Г., Гудименко К.В., Чиженко Н.П.

Показано, що при вирішенні проблеми підвищення довговічності цементо-бетону слід врахувати взаємозв'язок властивостей вихідних матеріалів, складу бетонної суміші, структури і властивостей бетону, технологічних, експлуатаційних факторів і природно-кліматичних впливів. У зв'язку з цим, що проблема підвищення довговічності цементобетонних покриттів носить комплексний характер, що включає конструктивні, матеріалознавчі та технологічні аспекти.

Ключові слова: високоміцний дорожній цементобетон, довговічність, оптимальність структури, пористість, морозостійкість, комплексні добавки.

THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF TECHNOLOGICAL IMPROVEMENTS INDICATORS ECONOMIC FEASIBILITY AND DURABILITY high-strength cement and concrete in road construction

©Shurgaya A.G., Gudimenko K.V., Chizhenko N.P.

It is shown that when improving the durability of cement concrete should take into account the relationship of the original materials of concrete, the structure and properties of concrete, technical factors, operational and climatic influences. In connection with this problem of improving the durability of concrete slabs is comprehensive, including design, materials science and technological aspects.

Keywords: high-strength cement concrete road, durability, optimal structure, porosity, frost, complex additives.