

А. А. ЧУБ (Запорожская государственная инженерная академия)

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ, ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ БЕТОНА ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

У статті представлені результати досліджень морозостійкості, міцнісних і деформативних властивостей бетону від технологічних характеристик бетонних сумішей, що викликано необхідністю правильного прийняття технологічних і організаційних рішень при будівництві об'єктів залізничного транспорту.

*Ключові слова:* морозостійкість, бетон, бетонна суміш, будівництво

В статье представлены результаты исследований морозостойкости, прочностных и деформативных свойств бетона от технологических характеристик бетонных смесей, что вызвано необходимостью правильного принятия технологических и организационных решений при строительстве объектов железнодорожного транспорта.

*Ключевые слова:* морозоустойчивость, бетон, бетонная смесь, строительство

The article presented the results of studies of frost resistance, strength and deformation properties of concrete on the technological characteristics of concrete mixtures, which was required for proper consideration of technological and organizational solutions in the construction of railway facilities.

*Keywords:* frost-resistance, concrete, concrete mixtures, building

### Постановка проблемы

Как показывает эксплуатационная практика железобетонных объектов железнодорожного транспорта, с требованиями к бетону по морозостойкости, они разрушаются. Затраты на текущие и капитальные ремонты за эксплуатационный период существенно увеличивают их стоимость. Причем, эксплуатационная продолжительность работы конструкций является функцией интенсивности воздействия на них переменных кратковременных и динамических нагрузок (конструкции мостов, шпалы и др.) [1].

*Анализ последних исследований и публикаций*, посвященных изучению долговечности железобетонных сооружений показывает, что они не охватывают вопросов, связанных с микротрещинообразованием в структуре бетона конструкций и сооружений в процессе воздействия на них переменных динамических нагрузок, от которых существенно зависит морозостойкость бетона [2-7].

*Целью настоящей статьи* является исследование морозостойкости, прочностных и деформативных свойств бетона от технологических характеристик бетонных смесей. Это вызвано необходимостью правильного принятия технологических и организационных решений при строительстве объектов железнодорожного транспорта, а также правильного выбора исходных материалов, состава и технологических

свойств бетонных смесей, от литых до особо жестких.

### Изложение основного материала

Исследования проводились по методике, описанной в [1] на бетонных смесях и бетонах, приготовленных в диапазоне расхода цемента от 200 до 600 кг/м<sup>3</sup>, то есть, в пределах изменения концентрации цемента в единице объема бетона  $C_{ц} - 0,0635...0,191$ , при изменении коэффициента нормальной густоты цементного теста в бетонной смеси  $K_{нг}$ , в пределах 0,876...1,65, с комплексной химической добавкой системы: вода, С-3, ГКЖ-11К, СКС-65ГП (табл. 1).

Диапазон расхода цемента, принятый в исследованиях, в пределах от 200 до 600 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, обусловлен тем, что при расходе цемента менее 200 кг/м<sup>3</sup> бетона, мы не можем говорить о бетоне как морозостойком материале, с достаточно высокими прочностными и другими физико-техническими свойствами. Бетоны с расходом цемента более 600 кг/м<sup>3</sup> имеют высокие значения концентрации цемента и цементно-песчаного отношения в межзерновом пространстве крупного заполнителя. Такие бетоны обладают высокой усадкой, ползучестью, а их микро- и макроструктура склонна к растрескиванию во времени. Говорить о них, как о морозостойких, также не целесообразно.

Характеристики исследуемых составов бетонных смесей с комплексной химической добавкой

| № состава | $K_{НГ}$ | В/Ц   | $K_p$ | Ц, кг | Ж <sub>ф</sub> , кг | Щ, кг | П, кг | $V_{воз}$ , % | $m_v$ , кг/м <sup>3</sup> | $K_y$ |
|-----------|----------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|---------------|---------------------------|-------|
| 1         | 0,876    | 0,640 | 1,05  | 200   | 128                 | 1414  | 747   | 2,50          | 2489                      | 0,975 |
| 2         | 1,000    | 0,935 | 1,15  | 200   | 187                 | 1293  | 708   | 2,00          | 2388                      | 0,950 |
| 3         | 1,100    | 1,015 | 1,20  | 200   | 203                 | 1233  | 727   | 1,60          | 2363                      | 0,948 |
| 4         | 1,650    | 1,190 | 1,25  | 200   | 238                 | 1173  | 691   | 0,70          | 2302                      | 0,993 |
| 5         | 0,876    | 0,447 | 1,10  | 300   | 134                 | 1353  | 707   | 2,50          | 2494                      | 0,975 |
| 6         | 1,000    | 0,627 | 1,20  | 300   | 188                 | 1233  | 683   | 2,00          | 2404                      | 0,980 |
| 7         | 1,100    | 0,677 | 1,25  | 300   | 203                 | 1173  | 700   | 1,80          | 2376                      | 0,982 |
| 8         | 1,650    | 0,830 | 1,30  | 300   | 249                 | 1112  | 641   | 0,80          | 2302                      | 0,992 |
| 9         | 0,876    | 0,358 | 1,15  | 400   | 143                 | 1293  | 657   | 3,00          | 2494                      | 0,970 |
| 10        | 1,000    | 0,478 | 1,25  | 400   | 191                 | 1173  | 649   | 2,50          | 2413                      | 0,975 |
| 11        | 1,100    | 0,520 | 1,30  | 400   | 208                 | 1112  | 665   | 2,00          | 2385                      | 0,980 |
| 12        | 1,650    | 0,660 | 1,35  | 400   | 264                 | 1052  | 576   | 1,00          | 2292                      | 0,990 |
| 13        | 0,876    | 0,312 | 1,20  | 500   | 156                 | 1233  | 598   | 3,90          | 2487                      | 0,961 |
| 14        | 1,000    | 0,400 | 1,30  | 500   | 200                 | 1112  | 601   | 3,00          | 2413                      | 0,970 |
| 15        | 1,100    | 0,436 | 1,35  | 500   | 218                 | 1052  | 614   | 2,50          | 2384                      | 0,975 |
| 16        | 1,650    | 0,572 | 1,40  | 500   | 286                 | 992   | 493   | 1,20          | 2271                      | 0,988 |
| 17        | 0,876    | 0,287 | 1,25  | 600   | 172                 | 1173  | 530   | 5,00          | 2475                      | 0,950 |
| 18        | 1,000    | 0,358 | 1,35  | 600   | 215                 | 1052  | 536   | 4,00          | 2403                      | 0,960 |
| 19        | 1,100    | 0,392 | 1,40  | 600   | 235                 | 992   | 544   | 3,50          | 2371                      | 0,965 |
| 20        | 1,650    | 0,523 | 1,45  | 600   | 314                 | 931   | 394   | 1,60          | 2239                      | 0,984 |

В табл. 2 представлены прочностные характеристики бетонов с комплексной химической добавкой. Предел изменения коэффициента нормальной плотности цементного теста в бетонной смеси  $K_{НГ} = 0,876...1,65$ , охватывает весь диапазон реально существующих бетонных смесей и бетонов, имеющих слитное строение, соответствующее зоне связности и тиксотропии цементного теста.

Ранее было показано, что при значении  $K_{НГ}$  цементного теста менее 0,876, остаточный объем воздуха в уплотненной стандартным способом цементной системе резко растет, что говорит о минимальном значении  $K_{НГ}$ , обеспечивающим равномерное обводнение частиц цемента. При значениях  $K_{НГ}$  цементного теста в цементных системах более 1,65, происходят процессы седиментации и водоотделения. С

увеличением расхода цемента на м<sup>3</sup> бетона наблюдается рост призмной и кубиковой прочности по закономерности, близкой к логарифмической, во всем диапазоне изменения значений  $K_{НГ}$ . При увеличении значения  $K_{НГ}$ , во всем диапазоне расхода цемента на м<sup>3</sup> бетона, наблюдается уменьшение прочности.

Таким образом, концентрация цемента в единице объема бетонной смеси  $C_{Ц}$  и коэффициент нормальной плотности цементного теста в бетонной смеси  $K_{НГ}$ , позволили более доступно и полно раскрыть физический смысл изменчивости функции  $R_0 = f(B/C)$ , столь широко используемой в формулах, предназначенных для определения состава бетона заданной прочности.

Прочностные характеристики бетонов с комплексной химической добавкой

| № состава | $R_6$ , МПа | $R_{П}$ , МПа | $R_T^0$ , МПа | $R_T^0 / R_{П}$ , МПа | $R_T^V$ , МПа | $R_T^V / R_{П}$ , МПа | $M_{рз}$ , циклы |
|-----------|-------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|-----------------------|------------------|
| 1         | 21,05       | 15,60         | 8,42          | 0,54                  | 13,30         | 0,85                  | 95               |
| 2         | 16,50       | 12,20         | 6,60          | 0,54                  | 10,10         | 0,83                  | 60               |
| 3         | 16,25       | 12,00         | 6,36          | 0,53                  | 9,84          | 0,82                  | 55               |
| 4         | 15,10       | 11,00         | 5,83          | 0,53                  | 9,02          | 0,82                  | 50               |
| 5         | 34,30       | 25,70         | 15,80         | 0,55                  | 22,10         | 0,86                  | 215              |
| 6         | 27,40       | 20,60         | 11,30         | 0,55                  | 17,51         | 0,85                  | 150              |
| 7         | 26,08       | 19,80         | 10,70         | 0,54                  | 16,63         | 0,84                  | 140              |
| 8         | 23,70       | 17,50         | 9,45          | 0,54                  | 14,53         | 0,83                  | 120              |
| 9         | 46,30       | 35,20         | 19,70         | 0,56                  | 31,00         | 0,88                  | 340              |
| 10        | 38,70       | 29,40         | 16,20         | 0,55                  | 25,30         | 0,88                  | 250              |
| 11        | 38,30       | 28,70         | 15,80         | 0,55                  | 24,70         | 0,86                  | 240              |
| 12        | 32,30       | 24,20         | 13,10         | 0,54                  | 20,60         | 0,85                  | 200              |
| 13        | 54,90       | 41,70         | 23,80         | 0,57                  | 37,10         | 0,89                  | 430              |
| 14        | 49,30       | 37,50         | 21,00         | 0,56                  | 33,00         | 0,88                  | 370              |
| 15        | 48,60       | 36,50         | 20,40         | 0,56                  | 31,80         | 0,87                  | 360              |
| 16        | 40,00       | 30,50         | 16,80         | 0,55                  | 26,50         | 0,87                  | 280              |
| 17        | 60,60       | 46,70         | 27,10         | 0,58                  | 41,60         | 0,89                  | 490              |
| 18        | 56,40       | 42,90         | 24,50         | 0,57                  | 37,80         | 0,88                  | 440              |
| 19        | 55,40       | 42,10         | 23,60         | 0,56                  | 37,00         | 0,88                  | 430              |
| 20        | 45,90       | 34,40         | 19,30         | 0,56                  | 29,90         | 0,87                  | 340              |

Примечание.  $R_6$  – кубиковая прочность бетона;  $R_{П}$  – призмная прочность бетона;  $R_T^0$ ,  $R_T^V$  – напряжения, соответствующие нижней и верхней параметрическим точкам

Технологические характеристики  $C_{Ц}$  и  $K_{НГ}$  могут существенно усовершенствовать данную зависимость и методику определения состава тяжелого бетона, в связи с технологическими условиями приготовления, доставки, укладки и уплотнения бетонной смеси.

Нижняя граница образования микротрещин, или первая параметрическая точка ( $R_T^0$ ) соответствует напряжениям, при которых начинается интенсивное образование микротрещин и определяется по диаграмме состояний, в момент максимального сокращения времени прохождения ультразвукового импульса. При ( $R_T^0$ ) начинается интенсивный рост образования микротрещин в зонах сцепления цементного камня с заполнителем. Величина  $R_T^0$  является верхним пределом области условно-упругой работы бетона, которая соответствует

наибольшему сокращению времени распространения ультразвукового импульса в нагруженном бетонном образце.

Величина  $R_T^V$ , является верхним пределом области развития пластических деформаций и образования микротрещин, определяемых величиной напряжений сжатия, соответствует возрастанию величины коэффициента поперечной деформации.

Значения  $R_T^0$  растут при увеличении  $C_{Ц}$ . При постоянных же расходах цемента на м<sup>3</sup> бетона,  $R_T^0$  плавно уменьшается с увеличением значения  $K_{НГ}$ . При этом, абсолютное значение  $R_T^0$  тем выше, чем больше расход цемента на м<sup>3</sup> бетона, а при постоянном расходе цемента,  $R_T^0$  тем выше, чем меньше значение  $K_{НГ}$ .

Верхние значения области микротрещинообразования в бетоне  $R_T^V$  имеют аналогичные закономерности, что и  $R_T^0$ . Значения  $R_T^0$  и  $R_T^V$  уменьшаются с понижением расхода цемента, так как при этом происходит увеличение концентрации заполнителя в бетоне. Следовательно, увеличивается и протяженность контактной зоны между цементным камнем и заполнителем. По мере увеличения  $K_{НГ}$  цементного теста, при постоянном расходе цемента, все значения параметров процесса микротрещинообразования снижаются, вследствие ухудшения сцепления между цементным камнем и заполнителем.

Показателями деформативности бетона, при кратковременном осевом статическом сжатии, являются начальный модуль упругости и деформации, которые появляются, либо к моменту потери несущей способности, либо к моменту достижения уровней микротрещинообразования.

При дальнейшем повышении расхода цемента и его  $K_{НГ}$  модуль упругости бетона начинает понижаться. Это связано с тем, что при больших значениях расхода цемента на  $m^3$  бетона зерна заполнителя располагаются на значительном расстоянии друг от друга, поэтому упругие свойства материала определяются, главным образом, свойствами цементного камня, который обладает высокой прочностью, однако имеющего меньшую упругость.

Одновременно со статическим модулем упругости определяли величину динамического модуля упругости ( $E_{дин}$ ). Исследовали закономерности изменения линейных деформаций бетона при кратковременном статическом нагружении. С этой целью определяли продольные и поперечные деформации, соответствующие нижней ( $R_T^0$ ) и верхней ( $R_T^V$ ) границам процесса микротрещинообразования и близких к призмочной прочности, а также максимальной объемной деформации, определенной при напряжениях, соответствующих верхней параметрической точке.

Четких зависимостей линейных продольных и поперечных деформаций, соответствующих нижней параметрической точке ( $\epsilon_1^1$  и  $\epsilon_2^1$ ), верхней параметрической точке ( $\epsilon_1^2$  и  $\epsilon_2^2$ ), близких к ( $\epsilon_1^3$  и  $\epsilon_2^3$ ), а также максимальных объемных деформаций ( $Q_{max}$ ) от  $B/C$  затворения не зафиксировано.

Однако, с помощью показателей объемной концентрации расхода цемента на  $m^3$  бетонной

смеси  $C_{Ц}$  и  $K_{НГ}$  цементного теста удалось установить общую тенденцию снижения деформативных свойств бетона с увеличением  $B/C$  затворения, как при  $C_{Ц} = const$ , так и при  $K_{НГ} = const$ , при снижении  $C_{Ц}$ .

Деформативные свойства бетона связаны с величиной их общей пористости. Установить определенные зависимости деформативных свойств бетона от общей пористости возможно только с учетом  $C_{Ц}$  и  $K_{НГ}$ . Зависимости деформаций ( $\epsilon_1^1, \epsilon_2^1, \epsilon_1^2, \epsilon_2^2, \epsilon_1^3, \epsilon_2^3, Q_{max}$ ), так же как и прочностных свойств от общей пористости бетона носят противоречивый характер. С одной стороны, при увеличении общей пористости, при  $C_{Ц} = const$ , с увеличением  $K_{НГ}$ , деформативные свойства понижаются, с другой стороны, при  $K_{НГ} = const$ , с увеличением  $C_{Ц}$  деформативные свойства повышаются.

Для всех видов морозостойких бетонов с модифицированным поверхностным слоем, в пределах расхода цемента на  $m^3$  от 200 до 600 кг и изменении коэффициента нормальной плотности цементного теста в бетонной смеси  $K_{НГ}$ , в пределах 0,876...1,65, важнейшими показателями, определяющими возможность совместной работы слоев бетона, как структурно-целостного материала, по мнению автора, являются отношения  $R_T^0/\epsilon_1^1 \times 10^{-3}$  и  $R_T^V/\epsilon_1^2 \times 10^{-3}$ . Это вполне обосновано, так как эти отношения определяют одновременно прочностные и деформативные свойства слоев бетона.

Двухслойная бетонная композиция, которой является тяжелый бетон с высокоморозостойким поверхностным слоем, должна иметь одинаковые, или близкие значения коэффициентов, определяемых отношениями:  $K_1 = R_T^0/\epsilon_1^1$  и  $K_2 = R_T^V/\epsilon_1^2$  бетонного слоя (без химических добавок), с такими же значениями  $K_1^{х.д.} = R_{Т.х.д.}^0/\epsilon_{1.х.д.}^1$  и  $K_2^{х.д.} = R_{Т.х.д.}^V/\epsilon_{1.х.д.}^2$  поверхностного слоя бетона, то есть модифицированного комплексными химическими добавками. При соблюдении условий равенства, или близких к равенству коэффициентов условий работы слоев бетона  $K_1 = K_1^{х.д.}$  и  $K_2 = K_2^{х.д.}$ , будет обеспечена возможность совместной работы слоев бетона, как структурно-целостного материала.

Деформативные свойства бетонов с комплексной химической добавкой

| № состава | $\epsilon_1^1 \times 10^4$ | $\epsilon_1^2 \times 10^4$ | $\epsilon_1^3 \times 10^4$ | $\epsilon_2^1 \times 10^4$ | $\epsilon_2^2 \times 10^4$ | $\epsilon_2^3 \times 10^4$ | $R_T^0 / \epsilon_1^1 \times 10^{-3}$ ,<br>МПа | $R_T^V / \epsilon_1^2 \times 10^{-3}$ ,<br>МПа |
|-----------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--|--|
| 1         | 3,73                       | 7,91                       | 11,63                      | 0,81                       | 2,91                       | 3,66                       | 22,57  | 16,81  |
| 2         | 3,61                       | 7,80                       | 11,51                      | 0,79                       | 2,75                       | 3,64                       | 18,28  | 12,95  |
| 3         | 3,52                       | 7,61                       | 11,45                      | 0,78                       | 2,70                       | 3,63                       | 18,07  | 12,93  |
| 4         | 3,27                       | 7,42                       | 11,31                      | 0,76                       | 2,55                       | 3,61                       | 17,83  | 12,16  |
| 5         | 4,04                       | 8,81                       | 12,13                      | 0,84                       | 3,34                       | 3,88                       | 39,11  | 25,09  |
| 6         | 3,83                       | 8,62                       | 11,90                      | 0,81                       | 3,25                       | 3,74                       | 29,50  | 20,31  |
| 7         | 3,72                       | 8,51                       | 11,74                      | 0,80                       | 3,12                       | 3,48                       | 28,76  | 19,54  |
| 8         | 3,61                       | 8,32                       | 11,51                      | 0,78                       | 3,05                       | 3,42                       | 26,18  | 17,46  |
| 9         | 4,38                       | 10,21                      | 12,52                      | 0,86                       | 3,84                       | 4,22                       | 44,98  | 30,36  |
| 10        | 4,14                       | 9,86                       | 12,31                      | 0,85                       | 3,75                       | 4,15                       | 39,13  | 25,66  |
| 11        | 4,03                       | 9,71                       | 12,14                      | 0,84                       | 3,71                       | 4,05                       | 39,21  | 25,44  |
| 12        | 3,91                       | 9,10                       | 11,91                      | 0,82                       | 3,64                       | 3,92                       | 33,50  | 22,63  |
| 13        | 4,82                       | 11,41                      | 13,02                      | 0,89                       | 3,94                       | 4,63                       | 49,38  | 32,52  |
| 14        | 4,57                       | 11,10                      | 12,84                      | 0,88                       | 3,88                       | 4,51                       | 45,95  | 29,73  |
| 15        | 4,45                       | 10,82                      | 12,63                      | 0,86                       | 3,76                       | 4,44                       | 45,84  | 29,39  |
| 16        | 4,34                       | 10,44                      | 12,45                      | 0,85                       | 3,61                       | 4,22                       | 38,71  | 25,38  |
| 17        | 5,09                       | 12,22                      | 13,21                      | 0,93                       | 3,98                       | 4,98                       | 53,24  | 34,04  |
| 18        | 4,96                       | 11,91                      | 13,11                      | 0,91                       | 3,75                       | 4,75                       | 49,40  | 31,74  |
| 19        | 4,81                       | 11,72                      | 12,95                      | 0,90                       | 3,64                       | 4,61                       | 49,06  | 31,57  |
| 20        | 4,75                       | 11,52                      | 12,75                      | 0,88                       | 3,52                       | 4,52                       | 40,63  | 25,95  |

Примечание.  $\epsilon_1^1$  и  $\epsilon_2^1$  – относительные продольные и поперечные деформации при  $\sigma = R_T^0$ ,  $\epsilon_1^2$  и  $\epsilon_2^2$  – относительные продольные и поперечные деформации при  $\sigma = R_T^V$ ,  $\epsilon_1^3$  и  $\epsilon_2^3$  – относительные продольные и поперечные деформации  $\sigma = 0,92$  от  $R_{II}$

### Вывод

По мнению автора настоящей статьи, существенного повышения морозостойкости и, как следствие, долговечности железобетонных конструкций, воспринимающих переменные кратковременные и динамические воздействия, можно достичь проектируя их состав с учетом прогнозируемой величины  $R_T^0$ .

То есть, силовые и динамические воздействия в бетоне не должны превышать величины  $R_T^0$ . При этом перерасход цемента на м<sup>3</sup> бетона будет значительным. Однако для многих конструкций это оправдано (железнодорожные шпалы и др.).

При бетонировании конструкций с высокоморозостойким поверхностным слоем бетона, значения  $K_1$  и  $K_2$ , можно назвать критериями условия совместной работы слоев бетона с высокоморозостойким модифицированным поверхностным слоем, обеспечивающими его работу как структурно-целостного материала. Эти условия следует учитывать при определении состава бетона, который проектируется, в связи с технологическими требованиями доставки, укладки, уплотнения бетонных смесей и условиями твердения бетона.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чуб, А. А. Основы технологии ремонта и строительства бетонных железобетонных сооруже-

- ний с высокоморозостойким поверхностным слоем: монография [Текст] / А. А. Чуб. – Запорожье: ЗГИА, 2010. – 360 с.
2. Штарк, И. Долговечность бетона [Текст] / Иохен Штарк, Бернд Вихт. – К.: Оранта, 2004. – 301 с.
  3. Ушеров-Маршак, А. В. Методология бетоноведения: научный, образовательный и прикладной аспекты [Текст] / А. В. Ушеров-Маршак // Калориметрия цемента: сб. тр. – Х. : Факт, 2002. – С. 9–11.
  4. Серия «Строитель». Бетоны. Материалы. Технологии. Оборудование [Текст]. – М.: Стройинформ, Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 424 с.
  5. Руденко, Н. Н. Тяжелые бетоны с высокими эксплуатационными свойствами [Текст] / Н. Н. Руденко. – Днепрпетровск: Арт-Пресс, 1999. – 260 с.
  6. Фертак, М. Бетон – композиционный материал, подвергаемый воздействию факторов окружающей среды [Текст] / М. Фертак, Я. Малолепши // Прочность бетона и ее зависимость от технологических факторов состава и факторов окружающей среды: научно-технич.симпозиум. – Краков, 2004. – С. 5-39.
  7. Красюк, В. Г. Технология производства бетонов высокой морозостойкости и прочности для мостовых конструкций [Текст] / В. Г. Красюк // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. тр. В 2 ч. Ч.2. Технология бетона. – Минск: Стринко, 2007. – 348 с.

Поступила в редколлегию 21.09.2011.

Принята к печати 20.10.2011.