

The first results of working out experimentally-theoretical techniques of definition of the module of elasticity of granules of the small filler, based on application of settlement models for definition of effective characteristics of concrete are presented.

УДК 624.012.36

Санникова О.Г., Кондратчик А.А.

## ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ИЗ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА С АРМАТУРОЙ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

**Введение.** Проектирование железобетонных конструкций из напрягающего бетона с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом, требует решения ряда теоретических вопросов [1, 2, 3, 4], а именно:

- как в процессе расширения напрягающего бетона будет изменяться начальная величина усилия натяжения арматуры, фиксируемая упорами;
  - как будет происходить расширение напрягающего бетона в условиях, когда на него оказывает воздействие усилие, передаваемое от предварительно напряженной арматуры.
- Оба этих процесса взаимосвязаны и будут развиваться одновременно, оказывая влияние друг на друга.

Ответы на поставленные вопросы имеют практическое значение [3], так как позволяют не только определить последовательность и условия осуществления технологических операций при изготовлении самонапряженных конструкций с арматурой, преднапряженной комбинированным способом [1], но и оценить расчетным путем полученное напряженное состояние в сечениях элемента [2].

**1. Опытные образцы и методика исследований.** Были проведены экспериментальные исследования конструктивных элементов из напрягающего бетона с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом. Опытные образцы размером 120x120x1500 мм армировались одним стержнем Ø14 S800 по СТБ 1706 ( $\rho_l = 1,07\%$ ), располагаемым в центре сечения. Образцы отличались уровнем начальных напряжений в арматуре и видом косвенного армирования торцевых участков образцов:

- марка образца СН -  $\sigma_{0,max} = 0$ , арматура натягивалась физико-химическим способом при расширении напрягающего бетона, сетки косвенного армирования отсутствуют (базовые образцы);
- марка образца КНК0 -  $\sigma_{0,max} / f_{po,2k} = 0,518$ , арматура дополнительно деформировалась физико-химическим способом, сетки косвенного армирования отсутствуют;
- марка образца КНК40 -  $\sigma_{0,max} / f_{po,2k} = 0,505$ , арматура дополнительно деформировалась физико-химическим способом, сетки косвенного армирования ставились с шагом  $s=40$  мм на длине 160 мм;
- марка образца КНК80 -  $\sigma_{0,max} / f_{po,2k} = 0,524$ , арматура дополнительно деформировалась физико-химическим способом, сетки косвенного армирования ставились с шагом  $s=80$  мм на длине 160 мм.

Натяжение арматуры механическим способом выполнено гидравлическим домкратом фирмы Dycerhoff & Widmann, модель 74-113.00 (рис. 1) с последующим закреплением на упоры – торцы силовой рамы. При изготовлении опытных образцов использовались материалы, имеющие следующие характеристики, определенные при испытании:

- арматура - Ø14 S800 по СТБ 1706: относительное удлинение – 6%, временное сопротивление - 1128,2 МПа, условный предел упругости – 835,5 МПа, условный предел текучести – 982,1 МПа, начальный модуль упругости –  $2,098 \cdot 10^5$  МПа;
- напрягающий бетон: состав бетонной смеси на 1 м<sup>3</sup> 500кг: 750кг: 1150кг: 215л – напрягающий цемент (изготовлен в лаборатории БрГТУ): песок / щебень / вода. Основные характеристики напрягающего бетона (самонапряжение и прочности при сжатии) показаны на графиках, приведенных на рис. 2.

а)



б)



Рис. 1. Натяжение арматуры гидродомкратом (а) и способ закрепления на торцах силовой рамы (б)

Характеристики материалов определены по методикам СТБ 1338-2002 (напрягающий цемент), ТУ 67-938-87 (напрягающий бетон) и ГОСТ 12004-81 (арматура).

После бетонирования образцы выдерживали в воздушно-сухих условиях (1 сутки и с 29 по 113 сутки) и во влажных условиях (2-28 суток), а затем испытывали на изгиб по схеме статически определимой балки статической нагрузкой – сосредоточенной силой, приложенной в середине пролета ( $l_{eff} = 1020$  мм). Перед испытанием производили передачу остаточного усилия натяжения арматуры с упоров на бетон. Деформации бетона и арматуры фиксировали при помощи переносной миссуры и электротензодатчиков.

**2. Анализ изменения напряжений в арматуре на свободных участках.** Согласно теоретическим исследованиям, представленным в [3], было показано, что величина предварительного напряжения на свободных участках арматуры между торцами балок и наружными

Санникова Ольга Геннадьевна, аспирант кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Кондратчик Александр Аркадьевич, к.т.н., профессор кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

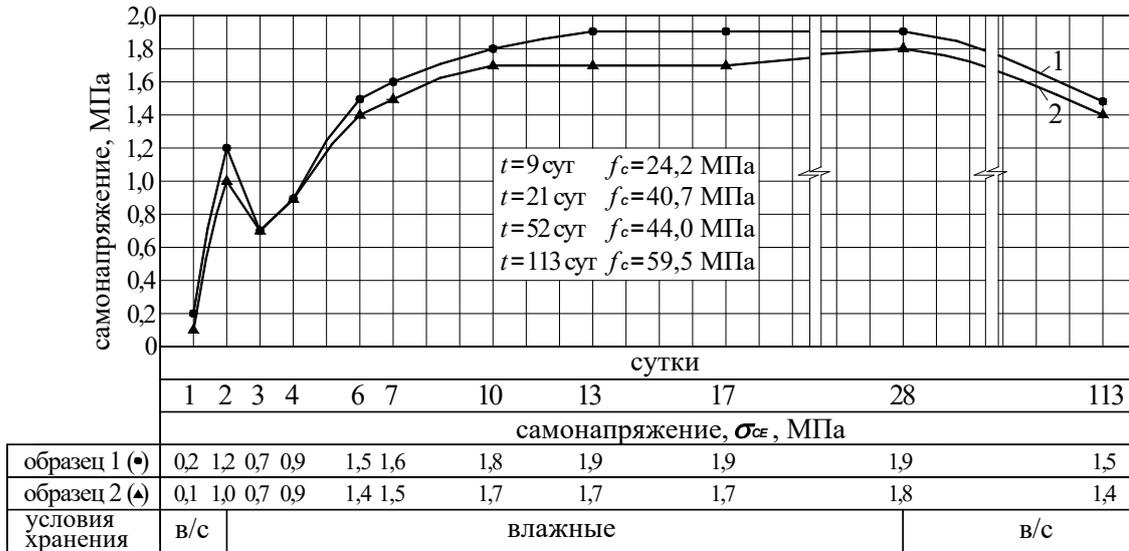


Рис. 2. Изменение самонапряжения в контрольных образцах: 1 – контрольный образец №1; 2 – контрольный образец №2

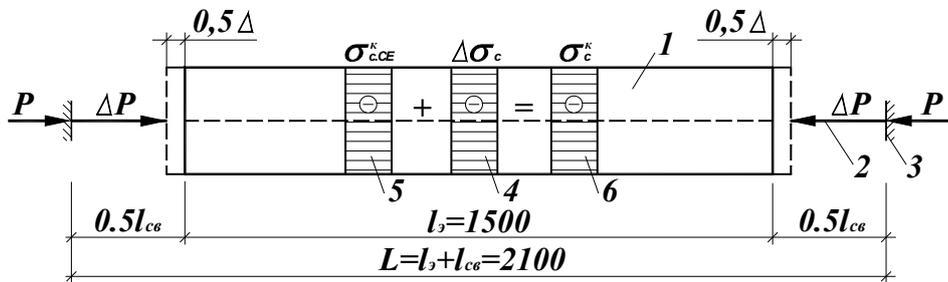


Рис. 3. Схема действующих усилий при предварительном напряжении арматуры комбинированным способом: 1 – элемент из бетона на НЦ; 2 – арматура, предварительно напряженная комбинированным способом; 3 – упоры – торцы силовой рамы; 4 – эпюра напряжений при действии  $\Delta P$ ; 5 – эпюра напряжений при развитии самонапряжения; 6 – общая эпюра напряжений в элементе

Таблица 1. Изменение напряжения в арматуре на свободных участках и усилия натяжения арматуры на упорах

Марка элемента	$\sigma_{св}$ , МПа	$f_{ci}$ , МПа	Изменение напряжения, МПа			Изменение усилия натяжения арматуры на упорах, кН		
			$\sigma_{0,max}$	$\Delta\sigma_{с.св}^{от}$	$\Delta\sigma_{с.св}^p$	$P_{0,max}$	$\Delta P_{с.св}^{от}$	$\Delta P_{0,св}^p$
КНК0	1,72	44,0	508,25	317,8	405,87	78,22	48,92	62,46
КНК40	1,75	44,0	496,43	273,3	412,95	76,40	42,06	63,55
КНК80	1,73	44,0	514,15	383,9	408,23	79,13	59,09	62,83

- $\Delta\sigma_{с.св}^{от}$  - снижение напряжений на свободных участках, зафиксированное при измерении связанных деформаций бетона.
- $\Delta\sigma_{с.св}^p$  - то же, определенное расчетным методом по формуле (1).
- Усилие натяжения арматуры, фиксируемое упорами, определено:  $P_{0,i} = \sigma_{si} \cdot A_s$ , кН

гранями упоров на стадии расширения напрягающего бетона будет снижаться. Величина этого снижения может быть определена по зависимости (рис. 3):

$$\Delta\sigma_{с.св}^{св} = \varepsilon_{с.св}^{св} \cdot E_s = \frac{\Delta \cdot E_s}{l_{св}} = \frac{\varepsilon_{с.св}^3 \cdot l_3}{l_{св}} \cdot E_s = \varepsilon_{с.св}^3 \cdot E_s \cdot k_n \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{с.св}^{св}$ ,  $\varepsilon_{с.св}^3$  – деформация арматуры физико-механическим способом на свободных участках и внутри элемента соответственно;  $l_{св}$ ,  $l_3$  – длина арматуры на свободных участках и внутри элемента соответственно.

$$k_n = \frac{l_3}{l_{св}} = \frac{1500}{600} = 2,5, \quad \varepsilon_{с.св}^3 = \frac{\sigma_{св} \cdot k_p \cdot k_s \cdot k_e}{\rho_l \cdot E_s} \quad (2)$$

при  $k_s = 1,0$ ;  $k_e = 1,0$ ;  $\rho_l = 0,0107$ ;  $E_s = 2,098 \cdot 10^5$  МПа;

$\sigma_{св}$  – величина самонапряжения на момент передачи усилия натяжения арматуры с упоров на бетон, определенная по контрольным образцам;

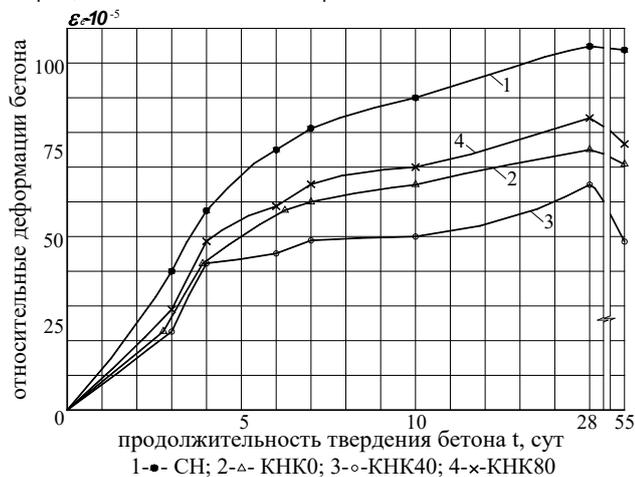
$$k_p = \sqrt{\frac{1,57 \rho_{lx}}{0,0057 + \rho_{lx}}} = \sqrt{\frac{1,57 \cdot 0,0107}{0,0057 + 0,0107}} = 1,01. \quad (3)$$

Сопоставление результатов расчета и опытных данных приведено в таблице 1.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что происходит снижение напряжения в арматуре на свободных участках. Расчетное значение изменения напряжения значительно отличается от измеренного в опыте. Причиной расхождения следует считать отсутствие учета дополнительных сжимающих напряжений от обжатия расширяющегося бетона усилием  $\Delta P$ .

**3. Развитие процесса самоупреждения.** Развитие процесса самоупреждения в железобетонных элементах происходило при различных по величине параметрах напряженного состояния: в балке марки СН дополнительные напряжения отсутствовали, а в балках марки КНК бетонное сечение дополнительно было обжато усилием  $\Delta P_0$ .

На стадии самоупреждения на опытных балках фиксировали деформации бетона (рис. 4). Измерения выполняли миссурой по реперам, наклеенным с базой измерения 355 мм.



**Рис. 4.** Связные деформации бетона самоупрежденных элементов с арматурой, напрягаемой физико-химическим способом (1) и комбинированным способом (2, 3, 4)

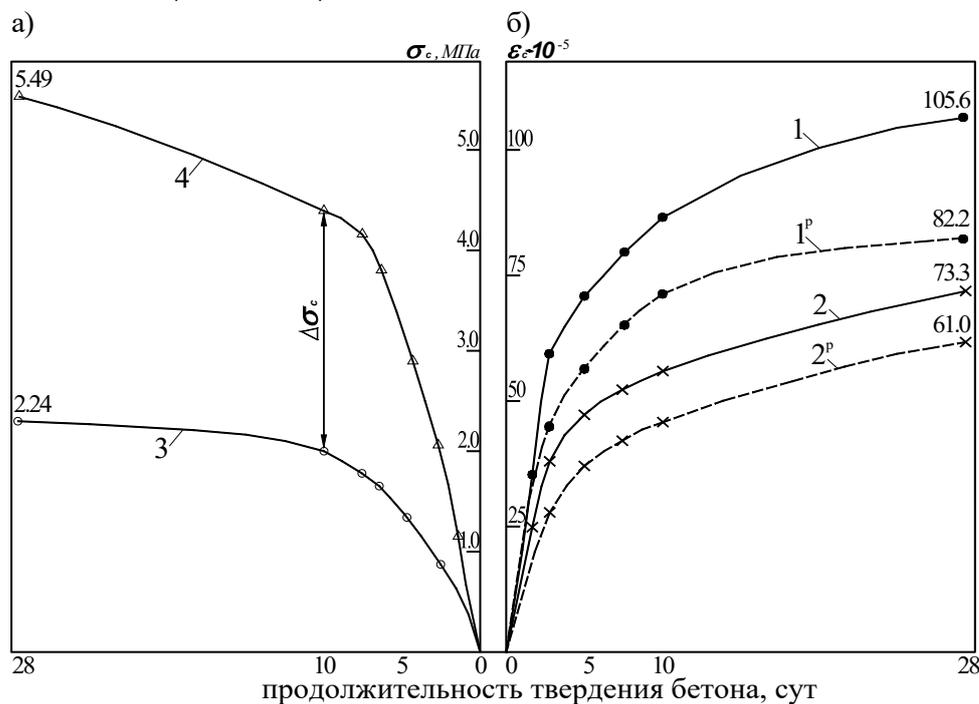
Анализ данных рисунка 4 показывает, что величина связных деформаций бетона образца марки СН с арматурой, напрягаемой физико-химическим способом, в среднем в 1,43 раза больше связ-

ных деформаций бетона образцов марки КНК с арматурой, напрягаемой комбинированным способом. Так как все параметры конструктивных элементов одинаковы ( $b \times h$ ,  $\rho_l$ ,  $\sigma_{CE}$  и т.д.), объяснением этого может быть только увеличение жесткости связей, препятствующих расширению.

Рассмотрим условия развития связных деформаций бетона в образце марки СН с арматурой, напрягаемой физико-химическим способом.

Примем, что расширение бетона происходит при наличии сцепления арматуры, выполняющей роль упругого ограничения, и бетона, т. е.  $\epsilon_c = \epsilon_s$ . Совместная деформация бетона и арматуры ведет к появлению усилия в арматуре ( $P_{CE} = \epsilon_{s,CE} \cdot E_s \cdot A_s$ ) и обжатие бетона этим усилием ( $\sigma_c = \sigma_{CE} = P_{CE} / A_c$ ). Особо отметим, что оба процесса – расширение и обжатие бетона – происходят одновременно, влияя друг на друга. Из этого следует, что расширение бетона (кривая 1, рис. 5) происходит при непрерывно изменяющемся по величине силовом воздействии на бетон в виде сжимающих напряжений (кривая 3, рис. 5). Примем эти данные за базовые.

Рассмотрим условия развития связных деформаций бетона в образце марки КНК40 с арматурой, напрягаемой комбинированным способом. Арматура до развития самоупреждения имеет напряжения, созданные механическим способом ( $\sigma_{0,max}$ ), а усилие натяжения арматуры ( $P_0 = \sigma_{0,max} \cdot A_s$ ) воспринимается упорами рамы. Натягающий бетон набирает прочность и появляется сцепление арматуры с бетоном. До этого момента условия взаимодействия бетона и арматуры в обоих образцах одинаковы. Бетон расширяется, а при  $\epsilon_c = \epsilon_s^k$  деформируется и арматура. В арматуре, находящейся внутри элемента, возникает усилие ( $P_{CE} = \epsilon_{s,CE}^k \cdot E_s \cdot A_s$ ),



- - (1) - средние связные деформации бетона образца марки СН;
- x - (2) - средние связные деформации бетона образца марки КНК40;
- o - (3) - напряжения сжатия в сечении образца марки СН;
- Δ - (4) - напряжения сжатия в сечении образца марки КНК40;
- ● - (1<sup>p</sup>) - расчетное значение связных деформаций бетона образца марки СН;
- x - (2<sup>p</sup>) - расчетное значение связных деформаций бетона образца марки КНК40

**Рис. 5.** Сравнение условий развития связных деформаций бетона (б) при действии сжимающих напряжений (а) в конструктивных элементах с арматурой, напрягаемой физико-химическим способом (марка СН) и комбинированным способом (марка КНК40)

которое действует на бетон, создавая напряжения сжатия ( $\sigma_c = \sigma_{cE}^k = P_{CE} / A_c$ ). Одновременно весь конструктивный элемент с арматурой увеличивается по длине на величину  $\Delta = \varepsilon_s^k \cdot l_3$  (мм), уменьшая длину участков арматуры вне образца (т. н. свободные участки) и тем самым снижая величину  $\sigma_{0,max}$  на свободных участках  $\Delta\sigma_s = \Delta \cdot E_s / l_{ce} = \varepsilon_s^k \cdot l_3 \cdot E_s / l_{ce} = \varepsilon_s^k \cdot l_3 \cdot k_n$ . Снижение напряжения в арматуре на свободных участках приведет к появлению усилия обжатия бетона ( $\Delta P = \Delta\sigma_s \cdot A_s$ ), приложенного к торцам элемента, и возникновению дополнительных напряжений сжатия ( $\Delta\sigma_c = \Delta P / A_c$ ). Следовательно, связанные деформации бетона в конструктивных элементах с арматурой, напрягаемой комбинированным способом, будут развиваться тоже при действии сжимающих напряжений, так же изменяющихся во времени, но имеющих большую величину ( $\sigma_c^k = \sigma_{cE}^k + \Delta\sigma_c$ ). На рисунке 5 связанные деформации элемента КНК40 представлены кривой 2, а сжимающие напряжения – кривой 4.

Определим расчетом значение связанных деформаций конструктивных элементов в возрасте 28 сут., и сравним с измеренными деформациями на опытных образцах.

Образец марки СН с арматурой, напрягаемой физико-химическим способом.

$$\varepsilon_{s,CE}^p = \varepsilon_{c,CE}^p = \frac{\sigma_{cE} \cdot k_p \cdot k_s \cdot k_e}{\rho_l \cdot E_s} = \frac{1,85 \cdot 1,01 \cdot 1 \cdot 1}{0,0107 \cdot 2,098 \cdot 10^5} = 82,2 \cdot 10^{-5},$$

$$\varepsilon_{c,CE}^{on} = 105,6 \cdot 10^{-5} > 83,3 \cdot 10^{-5} (+21,2\%),$$

где  $\sigma_{cE}$  – самонапряжение, определенное по контрольным образцам.

Образец марки КНК40 с арматурой, напрягаемой комбинированным способом.

$$\sigma_c^k = \sigma_{c,CE}^k + \Delta\sigma_c = \sigma_{cE} \cdot k_p (1 + k_n) = \varepsilon_{c,CE}^k \cdot E_c \cdot k_p (1 + k_n), \quad (5)$$

где  $\sigma_c^k$  – общие напряжения в бетоне от самонапряжения и обжатия арматурой, напрягаемой комбинированным способом;

$\sigma_{c,CE}^k$  – самонапряжение в элементе с арматурой, напрягаемой комбинированным способом.

$$\sigma_{c,CE}^k = \sigma_{cE} \cdot k_p^k = \varepsilon_{c,CE}^k \cdot E_c, \quad (6)$$

$$k_p^k = \sqrt{\frac{1,57 \rho_l^k}{0,0057 + \rho_l^k}}, \quad (7)$$

где  $\rho_l^k$  – процент армирования сечения, характеризующий жесткость упругого ограничения деформациям расширения.

$$\varepsilon_{s,CE}^k = \varepsilon_{c,CE}^k = \frac{\sigma_{cE} \cdot k_p^k \cdot k_s \cdot k_e}{\rho_l \cdot E_s} = \frac{\sigma_{cE} \cdot k_p^k}{\rho_l \cdot E_s},$$

$$\varepsilon_{s,CE}^k = \frac{\sigma_{cE} \cdot k_p^k}{\rho_l \cdot E_s} \neq \varepsilon_{s,CE} = \frac{\sigma_{cE} \cdot k_p}{\rho_l \cdot E_s}$$

т. е.  $k_p^k \neq k_p$ .

Так как связанные деформации бетона элемента с арматурой, напрягаемой комбинированным способом, меньше ( $\varepsilon_{c,cp}^k / \varepsilon_{c,cp} = 73,9 / 105,6 = 0,7$ ), то и значение коэффициента  $k_p^k$  должно быть меньше значения коэффициента  $k_p$ .

При определении значения  $k_p$  по зависимостям (3) и (7) используется в качестве основного параметра коэффициент армирования

$\rho_l$ . Так как  $\rho_l$  влияет на величину упругого ограничения расширения бетона, определим значение  $\rho_l$  по опытным данным из условия:

$$\sigma_c = \frac{N_s}{A_c} = \frac{\sigma_s \cdot A_s}{A_c} = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot \rho_l.$$

Так как  $\varepsilon_s > \varepsilon_s^k$  при прочих равных условиях, то следует говорить об увеличении жесткости сопротивления расширению, однако  $\rho_l = const$  в опытных образцах. Тогда следует говорить о фиктивной жесткости ограничения.

Ранее в работе [2] было показано, что приложение дополнительных напряжений сжатия ограничивает деформации расширения. Сравним усилия в арматуре обоих образцов, определив их по величине связанных деформаций арматуры.

Для образца марки СН:

$$N_s = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s = 105,6 \cdot 10^{-5} \cdot 2,098 \cdot 10^5 \cdot 153,9 = 34096,4 \text{ Н.}$$

Для образца марки КНК40:

$$N_s^k = \varepsilon_s^k \cdot E_s \cdot A_s = 73,9 \cdot 10^{-5} \cdot 2,098 \cdot 10^5 \cdot 153,9 = 23860,99 \text{ Н.}$$

Фактически в образце марки КНК40 напряжения, действующие в арматуре внутри образца, больше:

$$N_s^{\phi} = N_s^k + k_n \cdot N_s^k = N_s^k (1 + k_n) = 23860,99(1 + 2,5) = 83513,4 \text{ Н.}$$

Это усилие больше, чем усилие от самонапряжения в образце марки СН в 2,45 раза и марки КНК40 в 3,5 раза. Следовательно, фиктивная жесткость сопротивления расширению должна быть в 2,5 раза выше, а эффект в 2,5 раза ниже по сравнению с элементами с арматурой, напрягаемой физико-химическим способом и в 3,5 раза ниже для элементов с арматурой, предварительно напрягаемой комбинированным способом. Это произойдет, если в зависимость для определения  $k_p$  подставить значение  $\rho_l$ , сниженное в 3,5 раза, т. е. на  $(1 + k_n)$ .

$$k_p^k = \sqrt{\frac{1,57 \rho_l / 3,5}{0,0057 + \rho_l / 3,5}} = \sqrt{\frac{1,57 \cdot 0,0107 / 3,5}{0,0057 + 0,0107 / 3,5}} = 0,74.$$

Тогда

$$\varepsilon_{c,CE}^k = \frac{\sigma_{cE} \cdot k_p^k \cdot k_s \cdot k_e}{\rho_l \cdot E_s} = \frac{1,85 \cdot 0,74 \cdot 1 \cdot 1}{0,0107 \cdot 2,098 \cdot 10^5} = 61,0 \cdot 10^{-5} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{c,CE}^k = 73,9 \cdot 10^{-5} > \varepsilon_{c,CE}^{kp} = 61,0 \cdot 10^{-5} (17,5\%).$$

Расчетные значения связанных деформаций бетона приведены на рис. 5: кривая 1<sup>p</sup> построена по зависимости (4) для образца марки СН, кривая 2<sup>p</sup> построена по зависимости (8) для образца марки КНК40. Сопоставление характера кривых 1 и 1<sup>p</sup>, 2 и 2<sup>p</sup> свидетельствует о том, что принятая модель учета влияния дополнительных сжимающих напряжений на развитие связанных деформаций достаточно верно описывает развитие самонапряжения в условиях напряженного состояния, действующего в конструктивном элементе с арматурой, напрягаемой комбинированным способом (таблица 2).

Величина самонапряжения в опытных балках  $\sigma_{c,CE}$  определена по зависимости (9) для образцов марки СН и по зависимости (10) для образцов марки КНК.

$$\sigma_{c,CE} = \sigma_{cE} \cdot k_p \cdot k_s \cdot k_e = 1,01 \sigma_{cE}, \quad (9)$$

$$\sigma_{c,CE}^k = \sigma_{cE} \cdot k_p^k \cdot k_s \cdot k_e = 0,74 \sigma_{cE}. \quad (10)$$

Результаты расчета величины самонапряжения приведены в таблице 3.

Опытные образцы были испытаны на изгиб по схеме однопролетной статически определимой балки пролетом 1020 мм статической нагрузкой – сосредоточенной силой, приложенной в середине пролета. Результаты испытания приведены в таблице 4.

Анализ данных таблицы 4 показывает, что величина сжимающих напряжений в сечении конструктивных элементов больше значения самонапряжений в балках с арматурой, напрягаемой комбинированным способом, что свидетельствует о наличии дополнительных напряжений сжатия.

Таблица 2. Сравнение опытных и расчетных значений связанных деформаций бетона

Марка элемента	$\Delta_{cp} \cdot 10^{-2}$ , мм	$\varepsilon_{c,CE} \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_{c,CE}^k \cdot 10^{-5}$	$\frac{\varepsilon_{c,CE}}{\varepsilon_{c,CE}^k}$	$\frac{\varepsilon_{c,CE}}{\varepsilon_{c,CE}^k}_{cp}$	$\varepsilon_{c,CE}^p \cdot 10^{-5}$	$\varepsilon_{c,CE}^{kp} \cdot 10^{-5}$	$\frac{\varepsilon_{c,CE}}{\varepsilon_{c,CE}^p}$	$\frac{\varepsilon_{c,CE}^k}{\varepsilon_{c,CE}^{kp}}$	$\frac{\varepsilon_{c,CE}}{\varepsilon_{c,CE}^p}_{cp}$	$\frac{\varepsilon_{c,CE}^k}{\varepsilon_{c,CE}^{kp}_{cp}}$
СН	37,50	105,6	-	-	-	83,2	-	1,27	-	1,27	-
КНК0	22,50	-	63,4	1,66	1,45	-	61,0	-	1,04	-	1,21
КНК40	26,25	-	73,9	1,43				-	1,21		
КНК80	30,00	-	84,5	1,25				-	1,39		

$\Delta_{cp}$  – средние деформации бетона, измеренные миссурами в возрасте 28 сут.;

$\varepsilon_{c,CE}, \varepsilon_{c,CE}^k$  – средние опытные значения связанных деформаций бетона конструктивных элементов с арматурой, напрягаемой физико-химическим и комбинированным способом соответственно ( $\varepsilon_{c,CE}(\varepsilon_{c,CE}^k) = \Delta_{cp} \cdot 10^{-2} / l_b$ ,  $l_b = 355$  мм – база измерения);

$\varepsilon_{c,CE}^p, \varepsilon_{c,CE}^{kp}$  – средние расчетные значения связанных деформаций бетона конструктивных элементов с арматурой, напрягаемой физико-химическим и комбинированным способом соответственно

Таблица 3. Значения сжимающих напряжений в опытных балках на момент испытания

Марка элемента	Возраст бетона, сут	Самонапряжение по контр. образцам $\sigma_{cE}$ , МПа	Дополнительное усилие обжатия бетона $\Delta P^{on}$ , кН	Дополнительные напряжения сжатия в бетоне $\Delta \sigma_c^{on}$ , МПа	Напряжения сжатия от самонапряжения $\sigma_{c,CE}(\sigma_{c,CE}^k)$ , МПа	Полные напряжения сжатия $\sigma_c(\sigma_c^k)$ , МПа
СН	28/50	1,85/1,78	-	-	1,87/1,80	1,87/1,80
КНК0	28/113	1,85/1,45	51,18/48,92	3,55/3,40	1,37/1,07	4,92/4,47
КНК40	28/55	1,85/1,72	59,65/42,06	4,14/2,92	1,37/1,27	5,51/4,19
КНК80	28/110	1,85/1,46	68,21/59,09	4,74/4,10	1,37/1,08	6,11/5,18

$\Delta P^{on}$  – снижение усилия натяжения арматуры, фиксируемое упорами и определенное опытным путем;

$\Delta \sigma_c^{on} = \Delta P^{on} / A_c$  – дополнительные напряжения сжатия в бетоне;

$\sigma_{c,CE}, \sigma_{c,CE}^k$  – значение самонапряжения, определенное по формулам (9) и (10)

Таблица 4. Результаты испытания опытных балок на изгиб

Марка элемента	Нагрузка трещинообразования F, кН	$f_{ctk}^{on}$ , МПа	$f_{ctk}^p$ , МПа	$\sigma_c^{on}$ , МПа	Напряжения в балке по расчету, МПа			$\frac{\sigma_c^{on} - \sigma_c^p}{\sigma_c^{on}}$ , %
					$\sigma_{cE}(\sigma_{cE}^k)$ , МПа	$\Delta \sigma_c$	$\sigma_c(\sigma_c^k)$ , МПа	
СН	8,25	4,26	2,18	2,08	1,80	-	1,80	+13,5
КНК0	11,77	6,08	2,67	3,41	1,07	2,68	3,75	-10,0
КНК40	12,13	6,27	2,18	4,09	1,27	3,18	4,45	-8,8
КНК80	13,06	6,75	2,67	4,08	1,08	2,70	3,78	+7,4

1. Значение прочности бетона определено по зависимостям:  
 $f_{ctk}^{on} = \frac{M_{Sd} \cdot 3,5}{b \cdot h^2}$ ,  $f_{ctk}^p = 0,21 f_{ctk}^{2/3}$

2. Напряжения обжатия бетона  $\sigma_c$ , Н/мм<sup>2</sup>, определяются:  $\sigma_c = f_{ctk}^{on} - f_{ctk}^p$

3. Сжимающие напряжения в бетоне от действия усилия обжатия арматурой, преднапряженной механическим способом:  
 $\Delta \sigma_c = \sigma_{cE}^k \cdot k_n$

4. Балки испытаны в возрасте 50 сут (марка СН), 113 сут (марка КНК0), 55 сут (марка КНК40), 110 сут (марка КНК80).

**Заключение.** Выполненные исследования позволили установить особенности формирования напряженного состояния в элементах с арматурой, предварительно напрягаемой комбинированным способом:

1. Расширение напрягающего бетона привело к снижению усилия предварительного натяжения арматуры, фиксируемого упорами. Это позволяет запроектировать технологический процесс изготовления предварительно напряженных конструкций с плавной передачей усилия натяжения арматуры с упоров на бетон.

2. Величина самонапряжения бетона при действии сжимающих напряжений на структуру бетона зависит от величины дополнительных напряжений сжатия.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Кондратчик А. А. Экспериментально-теоретические основы расчета конструкций из напрягающего бетона при совместном действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил / А.А. Кондратчик. – Брест. Изд. БрГТУ, 2007. – 172 с.

2. Кондратчик А. А. Влияние напряженно-деформированного состояния, вызванного внешними воздействиями, на развитие процесса расширения / А. А. Кондратчик // Вестник БрГТУ. Сер. Строительство и архитектура. – 2008. – №1 (49). – С. 44-49.
3. Кондратчик А. А. Железобетонные конструкции с арматурой, предварительно напряженной комбинированным способом / А. А. Кондратчик // Строительная наука и техника. – 2008. – №5. – С. 44-53.
4. Тур В. В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона / В. В. Тур. – Брест. изд. БПИ, 1998. – 246 с.

Материал поступил в редакцию 02.02.09

**SANNIKOVA O. G, KONDRATCHIK A.A. Formirovanie of a tension in an element from straining concrete with the armature preliminary strained in the combined way**

The test results of stress change in combined prestressed reinforcement and the influence of reinforcement with initial stresses on the development of self-stressing and the formation of stress state at section of self-stressed concrete element are presented.

УДК 666.94

**Уласевич В.П., Якубовская О.А., Уласевич З.Н.**

## ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ, МОДИФИЦИРОВАННОГО ДОБАВКОЙ STG-3

**Введение.** Известно, что физико-механические свойства бетона (прочность, морозостойкость, водонепроницаемость, долговечность и др.) определяются микроструктурой цементного камня, и в первую очередь, особенностями поровой системы, морфологией продуктов гидратации и их прочностными характеристиками.

Формирование структуры цементного камня сопровождается рядом процессов. Это, прежде всего, растворение вяжущего, образование зародышей кристаллической гидратной фазы, рост кристаллов. По мере заполнения продуктами гидратации всего объема системы происходит формирование коагуляционной структуры, обусловленное сближением частиц до такого расстояния, когда становится физически возможным их срастание. Этот процесс имеет особое значение в связи с тем, что конечная прочность кристаллизационной структуры и ее физико-механические свойства имеют наследственный характер и предопределяются плотностью сформировавшейся коагуляционной структуры. Дальнейшее твердение цементного камня сопровождается образованием фазовых кристаллизационных контактов, обеспечивающих значительное упрочнение системы, а также перекристаллизацией существующих метастабильных кристаллогидратов, укрупнением коллоидных частиц и другими длительными процессами.

При этом М.М. Сычев [1] указывает, что важным свойством портландцементной системы является ее саморегулируемость. Очевидно, что применение химических добавок-модификаторов влияет на основные параметры гидратирующей системы, морфологию новообразований (внешний вид фаз, их форму, размер, удельную поверхность), а также степень их полимеризации. Поэтому актуальным является вопрос изучения механизма влияния добавок на микроструктуру цементного камня, которая, в конечном итоге, определяет основные свойства бетона.

В этой связи актуально использование аналитических методов, позволяющих адекватно определять форму, состав и структуру частиц, как исходных компонентов, так и новообразований в диапазоне размеров от десятков микрон до нанометров. Выполнить такие исследования становится возможным благодаря наличию современных электронных микроскопов, которые с каждым годом становятся все совершеннее [2].

Экспериментально, путем испытаний образцов-кубов [3, 4], а также физико-химическими исследованиями [5], доказано, что добавка для бетонов STG-3 ТУ РБ 02071613.379-2004 является ускорителем твердения бетона с проявлением свойств пластификатора.

Кроме того, в [4] показано, что добавка STG-3 усиливает защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре, увеличивает морозостойкость и водонепроницаемость. Добавка STG-3 представляет собой раствор гуминовых веществ (карбоксильных групп, фенольных гидроксидов, карбонильных, хинных групп и др.), их растворимых солей (гуматов и фульватов) и некоторых других веществ.

В связи с вышесказанным можно сделать вывод, что исследование микроструктуры цементного камня с использованием электронной микроскопии позволит полнее раскрыть механизм действия добавки STG-3 на процессы гидратации и структурообразования.

**Метод исследования, оборудование, материалы.** Среди различных аналитических методов исследования микроструктуры материалов заслуживает внимания метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с рентгеновским микроанализом, так как он позволяет быстро и достаточно полно получить информацию о топографии, кристаллографии и элементном составе исследуемого образца. Для формирования изображения на сканирующем электронном микроскопе применяются электронные линзы, обладающие возможностью фокусировки электронного пучка в пятно очень малых размеров. Это пятно непрерывно обегает некоторый участок образца аналогично лучу, обегавшему экран телевизионной трубки. Электрический сигнал, возникающий при бомбардировке объекта электронами пучка, используется для формирования изображения на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), развертка которой синхронизирована с системой отклонения электронного пучка. Увеличение в данном случае понимается как отношение размера изображения на экране к размеру области, обегаемой пучком на образце. Это увеличение составляет от 10 до 10 млн. В свою очередь рентгеновский микроанализатор дает возможность получать картины в рентгеновских лучах при сканировании поверхности образца электронным зондом. Эти картины показывают распределение химических элементов на интересующем участке. В этом случае используется тот факт, что частота испускаемого характеристического рентгеновского излучения является функцией атомного номера излучающего элемента.

Исследования выполнялись нами в Научно-исследовательском институте физико-химических проблем Белорусского государственного университета (НИИ ФХП БГУ). В качестве оборудования использован электронный микроскоп LEO-906E, оснащенный элементным анализатором типа Rontec (рис. 1).

**Уласевич Вячеслав Прокофьевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор Брестского государственного технического университета.

**Якубовская Ольга Александровна**, аспирант Брестского государственного технического университета.

**Уласевич Зинаида Николаевна**, кандидат технических наук, доцент Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.