

УДК 624.04

**Ерышев В.А.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: gsx@tltsu.ru

**Латышева Е.В.** – кандидат технических наук, доцент

E-mail: p-tata@mail.ru

**Бондаренко А.С.** – аспирант**Тольяттинский государственный университет**

Адрес организации: 445667, Россия, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14

**Усадочные деформации в бетонных и железобетонных элементах****Аннотация**

Целью работы являлось установление аналитической связи между относительными деформациями усадки бетонного и железобетонного образца с симметричным армированием.

В исследованиях использовались условия совместности деформаций бетона и арматуры, уравнения равновесия в сечениях железобетонного элемента. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, включающий измерения усадочных деформаций в бетонных и такого же размера железобетонных образцах во времени.

Установлено, что деформации бетонных элементов увеличиваются с начала измерений после распалубливания, а деформации железобетонных образцов – по истечении некоторого времени. В работе даны рекомендации по определению усадочных напряжений в бетоне и арматуре железобетонного элемента с учетом прерывания роста усадочных деформаций.

**Ключевые слова:** усадочные деформации, напряжение, бетон, экспериментальные исследования.

Большинство бетонов подвержено усадке. В бетонных конструкциях усадка нарастает равномерно и свободно. В железобетонных конструкциях усадочные деформации развиваются в стесненных условиях за счет внутренней связи бетона с арматурой и их величина уменьшается по сравнению со свободными деформациями, но в бетоне и арматуре возникают собственные напряжения. В процессе эксплуатации силовые деформации и напряжения от различных нагрузок изменяются не от нулевых значений, а суммируются с их собственными величинами, которые в расчетах и экспериментальных исследованиях, как правило, не учитываются.

В настоящей работе устанавливается связь между относительными деформациями усадки бетонного и железобетонного образца с симметричным армированием. Предлагаются способы и результаты экспериментального определения деформаций и напряжений от усадки бетона в железобетонном образце.

Принимаются следующие обозначения:  $\varepsilon_{sh}$  – свободные относительные линейные деформации бетонного образца в осевом направлении (величина положительная, в случае отрицательных значений в формулах принимается со знаком минус);  $\varepsilon_{sh,r}$  и  $\sigma_{s,sh}$  – относительные деформации и напряжения сжатия в арматуре, при этом  $\varepsilon_{sh,r}$  равны деформациям железобетонного элемента (т.е.  $\varepsilon_{sh,r} = \varepsilon$ , где  $\varepsilon$  – относительные деформации железобетонного элемента);  $\varepsilon_{et,sh}$   $\sigma_{es,sh}$  – относительные деформации и напряжения растяжения в бетоне железобетонного элемента (из условия равновесия, если арматура сжата, то бетон растянут).

Относительные деформации бетона, вызывающие его растяжение, равны разности деформаций бетонного и железобетонного элементов:

$$\varepsilon_{et,sh} = \varepsilon - \varepsilon_{sh}, \quad (1)$$

где относительные деформации  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_{sh}$  подставляются со своими знаками.

Напряжения в бетоне связаны с деформациями зависимостью:

$$\varepsilon_{et,sh} = \frac{\sigma_{et,sh}}{E_e \nu_{et,sh}}, \text{ или } \sigma_{et,sh} = \varepsilon_{et,sh} E_e \nu_{et,sh}, \quad (2)$$

где  $E_e$  – начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении;  $\nu_{et,sh}$  – коэффициент упругопластических деформаций бетона при усадке.

Из уравнения (1) с учетом (2) выразим деформации железобетонного элемента через напряжения в бетоне:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{et,sh}}{E_e \nu_{et,sh}} + \varepsilon_{sh}, \text{ или } \sigma_{et,sh} = (\varepsilon - \varepsilon_{sh}) E_e \nu_{et,sh}, \quad (3)$$

то же через напряжения в арматуре:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{s,sh}}{E_s}, \text{ или } \sigma_{s,sh} = \varepsilon E_s. \quad (4)$$

Записываем условие равновесия:

$$\sigma_{s,sh} A_s + \sigma_{et,sh} A_e = 0, \quad (5)$$

откуда  $\sigma_{et,sh} = -\sigma_{s,sh} \mu$ , где  $A_s$  – площадь арматуры;  $A_e$  – площадь поперечного сечения элемента;  $\mu = A_s/A_e$  – коэффициент армирования.

Подставляя (3) и (4) в уравнение (5), получим:

$$\varepsilon (E_e \nu_{et,sh} A_e + E_s A_s) - \varepsilon_{sh} E_e A_e \nu_{et,sh} = 0,$$

откуда:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{sh}}{1 + \alpha \mu / \nu_{et,sh}}, \text{ где } \alpha = \frac{E_s}{E_e}. \quad (6)$$

В формуле (6) неизвестными параметрами являются:  $\varepsilon_{sh}$  – свободные деформации усадки бетона и коэффициент упругопластических деформаций  $\nu_{bt,sh}$ . Значение коэффициента  $\nu_{bt,sh}$  можно определить с помощью итерационного процесса, последовательным приближением по  $\sigma_{bt,sh}$ , используя известные зависимости для  $\nu_{b(bt)}$  в редакции академика Н.И. Карпенко [1].

Деформации усадки бетона  $\varepsilon_{sh}$  зависят от многих факторов, включая составы бетона, режимы хранения после изготовления, размеров поперечного сечения и ряда других факторов. Поэтому значения деформаций  $\varepsilon_{sh}$  к моменту времени  $t$  могут определяться опытным путем, прямыми измерениями на стандартных образцах и отвечать конкретным условиям твердения бетона.

Усадочные трещины становятся проблемой в условиях естественного твердения бетона при монолитном бетонировании железобетонных конструкций на строительной площадке. Усадочные напряжения в железобетонных элементах влияют на трещинообразование, сцепление арматуры с бетоном и должны учитываться при производстве экспериментальных исследований, в том числе при осевых нагрузках сжатия и растяжения.

Для проведения экспериментальных исследований изготавливались 4 серии образцов с одинаковыми размерами 15×15×60 см. Серия включала: бетонные и железобетонные образцы, изготовленные в металлических опалубках одновременно из одного состава тяжелого бетона, в условиях Тольяттинского завода ЖБИ, в летний период времени. Составы бетона (табл. 1) подбирались варьированием весовых соотношений различных компонентов с учетом трех факторов: получения класса бетона в диапазоне В30-В45; различные величины усадочных деформаций в сериях; наличие компонентов на заводе. Железобетонные элементы армировались центральным стержнем диаметром 20 мм из арматуры класса А400 и пространственными каркасами у торцов с поперечной арматурой диаметром 6 мм, которая устанавливалась с шагом 50 мм на участках  $l_1=l_3=16$  см [2].

Измерения линейных деформаций усадки бетонных и железобетонных образцов производились при комнатной температуре после распалубливания на 3 суток (после окончания твердения свежееуложенного бетона во влажных условиях) с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленных в рамках на каждой грани образца (рис. 1). Продолжительность измерений определялась временем начала последующих испытаний каждого железобетонного образца на осевое растяжение и сжатие, поэтому составляла от 30 до 890 суток. В большей степени усадке подвержены образцы из мелкозернистого бетона, где в качестве заполнителя использовались отсеvy гранита.

Усадочные деформации увеличиваются: с ростом В/Ц, с количеством цемента на единицу объема бетона (при этом высокоактивные цементы дают большую усадку, что согласуется с литературными данными).

Таблица 1

## Состав бетонных смесей

Серия (класс б.)	Цемент	Заполнитель	Песок	В/ц	Пластификатор
1 (В30)	п.ц. 400, 325 кг/м <sup>3</sup>	карбонатный щебень фр. 5-20, М 600, 1265 кг/м <sup>3</sup>	кварцевый, Мкр=1,25>1,3, 560 кг/м <sup>3</sup>	0,51, 165 л/м <sup>3</sup>	-
2 (В45)	п.ц. 500, 450 кг/м <sup>3</sup>	дробленый гравий, фр. 5-20, М 1000, 1260 кг/м <sup>3</sup>	кварцевый, Мкр=2,56, 540 кг/м <sup>3</sup>	0,41, 185 л/м <sup>3</sup>	-
3 (В35)	п.ц. 500, 410 кг/м <sup>3</sup>	карбонатный щебень фр. 5-20, М 600, 1100 кг/м <sup>3</sup>	кварцевый, Мкр=1,2, 610 кг/м <sup>3</sup>	0,54, 221 л/м <sup>3</sup>	ЛМР-НЛХ
4 (В45)	п.ц. 500, 567 кг/м <sup>3</sup>	отсев гранитный фр. 0-5, М 1400, 1392 кг/м <sup>3</sup> ; порошок минеральный карбонатный МП-1, 113 кг/м <sup>3</sup>	речной Волжский, Мкр=1,2, 175 кг/м <sup>3</sup>	0,339, 192 л/м <sup>3</sup>	ГП Melflux 1641F (1,5 % от Ц)

Для сравнения в таблице 2 представлены опытные значения относительных усадочных деформаций на 28 суток измерения, а в таблице 3 – окончание измерения. Деформации бетонных образцов в 1,7-2 раза превышают деформации железобетонных образцов (рис. 2).

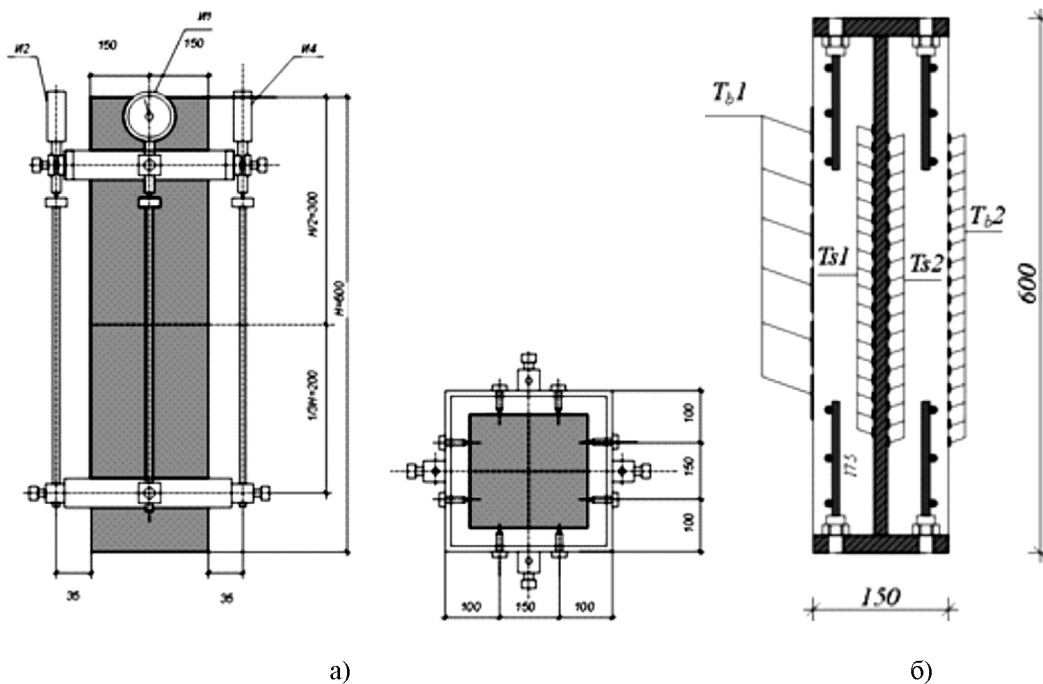


Рис. 1. Схема расстановки приборов: а – схема расстановки индикаторов; б – схема расстановки тензодатчиков: Tb1 – тензодатчики на бетоне, база 50 мм; Tb2 – тензодатчики на бетоне, база 10 мм; Ts1; Ts2 – тензодатчики на арматуре, база 10 мм

Из условия совместности деформаций бетона и арматуры, следуя закону (1), деформации усадки бетона  $\varepsilon_{et,sh}$ , вычисленные по опытным значениям  $\varepsilon_{sh}$  и  $\varepsilon$ , близки или превышают предельные их значения на растяжение  $\hat{\varepsilon}_{et}$ .

Напряжения в бетоне  $\sigma_{et,sh}$ , вычисленные по формуле (2), значительно превышают их значения из условия равновесия (5), а в отдельных случаях и предельные напряжения на растяжение  $R_{et}$ , хотя усадочные трещины в бетоне не обнаружены [2].

Из сравнения графиков роста усадочных деформаций  $\varepsilon_{sh}$  – в бетонных и  $\varepsilon$  – в железобетонных образцах следует, что свободные усадочные деформации увеличиваются с начала измерений, а деформации железобетонных образцов только на  $t_0 = 4-5$  суток после распалубливания.

Таблица 2

**Усадочные деформации бетонных и железобетонных образцов на 28 сутки**

Усадочные деформации	серия 1 (C1-1,2,3)	серия 2 (C2-1,2,3)	серия 3 (C3-1)	серия 4 (C4-1)
$\epsilon_{sh} \times 10^5$	21	29	32	46
$\epsilon_{sh,r} \times 10^5$	-	-	18	21

За время прерывания роста относительных деформаций  $\epsilon$  свободные деформации выросли на  $\Delta\epsilon_{t0} = (9-12) \times 10^{-5}$ , что составляет до 25 % от их значения на окончание измерений. С тем чтобы условие совместности деформирования бетона и арматуры выполнялось, из замеренных величин в опыте  $\epsilon_{sh}^{exp}$  вычтем значения  $\Delta\epsilon_{t0}$  (табл. 3).

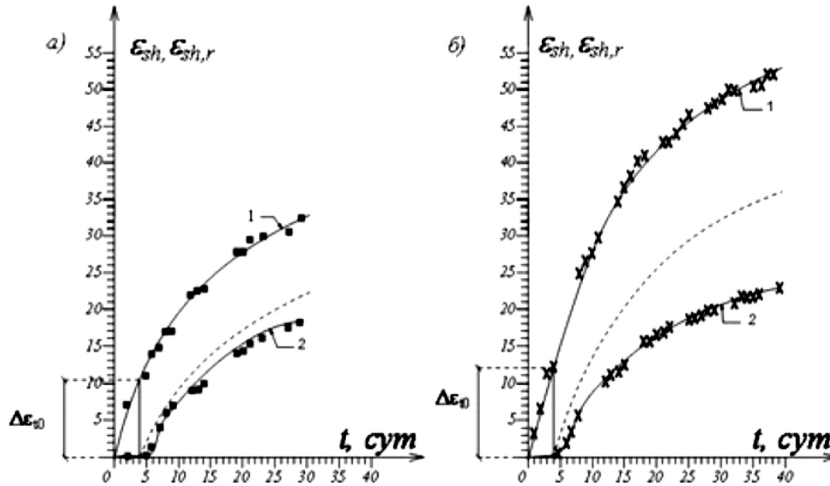


Рис. 2. Деформации усадки бетонных (1) и железобетонных образцов (2): а – серия 3; б – серия 4

С учетом  $\Delta\epsilon_{t0}$  свободные относительные деформации  $\epsilon_{sh}$  уменьшились по абсолютной величине, однако их значения примерно на 10 % превышают расчетные значения  $\epsilon$  по формуле (6), где  $\nu_{et,sh} = 0,9$ . Разница между этими относительными деформациями составляют фактические относительные деформации растяжения бетона от усадки  $\epsilon_{et,sh}$ .

Таблица 3

**Опытные и расчетные значения усадочных параметров**

Серия	Шифр	возраст образцов $t_{exp}, \text{сут}$	$\epsilon_{sh}^{exp} \times 10^5$ опыт	$\epsilon_{sh,r}^{exp} \times 10^5$ опыт	$\Delta\epsilon_{t0} \times 10^5$	$\epsilon_{sh}^{exp} = (\epsilon_{sh}^{exp} - \Delta\epsilon_{t0}) \times 10^5$	$\epsilon_{sh,r} \times 10^5$ ф-ла (6)	$\sigma_{s,sh}$ МПа ф-ла (4)	$\sigma_{b,sh}$ МПа ф-ла (5)	$\epsilon_{bt,sh} \times 10^5$ ф-ла (1)	$\sigma_{bt,sh}$ МПа ф-ла (2)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	C1-1	125	37	-	9	-28	-25	-50	0,60	2,6	0,61
	C1-2	135	37	-	9	-28	-25	-50	0,60	2,6	0,61
	C1-3	887	48	-	9	-39	-35	-70	0,84	3,7	0,85
2	C2-1	35	33	-	9	-24	-23	-45	0,54	1,4	0,54
	C2-2	45	36	-	9	-27	-25	-51	0,61	1,5	0,61
	C2-3	50	38	-	8	-30	-28	-56	0,68	1,7	0,68
3	C3-1	30	32	18	12	-20	-18	-37	0,44	1,4	0,45
4	C4-1	40	51	25	12	-39	-36	-71	0,85	2,3	0,86

Значения усадочных напряжений  $\sigma_{et,sh}$ , вычисленные из условия равновесия (5), и по относительным деформациям бетона (2), согласуются между собой и составляют 30÷40 % от предельных на растяжение  $\hat{\sigma}_{et} = R_{et}$ . Последующие испытания железобетонных

образцов на растяжение показали обоснованность указанных корректировок при сравнении опытных и расчетных значений усилий трещинообразования.

#### **Вывод:**

Усадочные деформации и напряжения в железобетонных конструкциях следует определять с учетом прерывания их развития после окончания твердения свежесделанного бетона во влажных условиях, уменьшая соответствующие свободные усадочные деформации бетона  $\varepsilon_{sh}$  на 25 %.

#### **Список литературы**

1. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. – М.: Стройиздат, 1996. – 412 с.
2. Ерышев В.А., Латышева Е.В., Бондаренко А.С. Методика экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния линейных железобетонных элементов при осевом нагружении повторными и знакопеременными нагрузками. – Вектор науки ТГУ, 2010, № 3. – С. 51-56.

**Eryshev V.A.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: gsx@tltstu.ru

**Latysheva E.V.** – candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: p-tata@mail.ru

**Bondarenko A.S.** – post-graduate student

**Tolyatti State University**

Address of organization: 445667, Russia, Tolyatti, Byelorussian, 14

#### **Shrink deformations in concrete and reinforced concrete elements**

#### **Resume**

Most concrete subjects are exposed to shrinkage. In concrete constructions with small sizes shrinkage develops evenly, freely and own tensions do not rise up. In reinforced concrete constructions shrink deformations develop in the straitened terms due to internal connection of concrete with an armature and their size diminishes as compared to free deformations, but there are own tensions in a concrete and armature. In the process of exploitation power deformations and tensions from different loadings change not from zero values, but added up with their own sizes which in calculations and experimental researches, as a rule, are not taken into account.

In the real work a connection is established between relative deformations of shrinkage of concrete and reinforced concrete standard with the symmetric reinforcing. On foundation results of experimental researches it is set, that free shrink deformations are increased from the beginning of measuring, and deformations of reinforced concrete standards only on  $t_0=4-5$  days after release. Taking into account breaking of growth of deformation of reinforced concrete standard from shrinkage of concrete experimental information satisfactorily comport with a calculation. It is recommended to determine deformations of reinforced concrete element from shrinkage of concrete through the proper free shrink deformations, diminishing them on 25 %.

**Keywords:** shrink deformations, tension, concrete, experimental research.

#### **References**

1. Karpenko N.I. the «General models of mechanics of the reinforced concrete». – М.: Stroyizdat, 1996. – 412 p.
2. Eryshev V.A., Latysheva E.V., Bondarenko A.S. Method of experimental researches of the tensely-deformed state of linear reinforced concrete elements at an axial load repeated and znakoperemennymi nagruzkami. – Tolyatti, «Vector of science of TGU», 2010, № 3. – P. 51-56.