

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-61-67

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

© Валерий Алексеевич Ерышев

Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия; e-mail: gsx@tltsu.ru

*Статья поступила 25 апреля 2018 г. Поступила после доработки 25 апреля 2018 г.
Принята к публикации 14 июня 2018 г.*

Исследованы механические свойства сложного композитного материала, который образуют сталь и затвердевший бетон. Предложена методика оперативного контроля качества новых эффективных бетонов и арматуры, в том числе в производственных условиях, включающая определение прочностных, деформационных характеристик материалов, а также сил сцепления, обуславливающих их совместную работу под нагрузкой. Представлена конструкция мобильной установки, в которой за счет реверса можно изменять направление действия нагрузки и испытывать армированный элемент установленной формы как на растяжение, так и на сжатие; при этом сокращается номенклатура испытательного оборудования, количество форм для изготовления образцов бетона. По усилиям образования трещин в бетоне, когда нарушается совместная работа бетона и арматуры, определяют значения собственных напряжений и величину деформаций от усадки бетона. Установлена аналитическая связь между усилиями и деформациями железобетонного образца с центральным армированием при осевом растяжении и сжатии с учетом деформаций и напряжений в арматуре и бетоне от усадки бетона. Представлены результаты экспериментальных исследований, включающие: диаграммы бетона на растяжение; диаграммы развития осевых деформаций с увеличением нагрузки при центральном нагружении армированных элементов. Разработана методика учета напряжений и деформаций от усадки бетона в расчетах железобетонных конструкций. Дана оценка эффективности аналитических выражений, устанавливающих связь между напряжениями и деформациями на диаграммах материалов для расчетов железобетонных конструкций по деформационной модели.

Ключевые слова: армированный элемент; диаграммы материалов; экспериментальные исследования; расчетные зависимости.

METHODOLOGY OF STUDYING THE MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS (REINFORCED CONCRETE)

© Valery A. Eryshev

Togliatti State University, Tolyatti, Russia; e-mail: gsx@tltsu.ru

Received April 25, 2018. Revised April 25, 2018. Accepted June 14, 2018.

The mechanical properties of a complex composite material formed by steel and hardened concrete, are studied. A technique of operative quality control of new credible concrete and reinforcement, both in laboratory and field conditions is developed for determination of the strength and strain characteristics of materials, as well as cohesion forces determining their joint operation under load. The design of the mobile unit is presented. The unit provides a possibility of changing the direction of loading and testing the reinforced element of the given shape both for tension and compression. Moreover, the nomenclature of testing equipment and the number of molds for manufacturing concrete samples substantially decrease. Using the values of forcing resulting in concrete cracking when the joint work of concrete and reinforcement is disrupted the values of the inherent stresses and strains attributed to the concrete shrinkage are determined. An analytical relationship between the forces and deformations of the reinforced concrete sample with central reinforcement is derived for axial tension and compression, with allowance for strains and stresses in the reinforcement and concrete resulted from concrete shrinkage. The results of experimental studies are presented, including tension diagrams and diagrams of developing axial deformations with an increase in the load under the central loading of the reinforced elements. A methodology of accounting for stresses and deformations resulted from concrete shrinkage is developed. The applicability of the derived analytical relationships between stresses and deformations on the material diagrams to calculations of the reinforced concrete structures in the framework of the deformation model is estimated.

Keywords: reinforced element; material diagrams; experimental studies; calculated dependencies.

Индустрия строительных материалов реформируется, становится восприимчивой к инновациям, которые вытесняют с рынка устаревшие технологии строительства, и приводит к появлению новых востребованных временем конструктивных решений и эффективных материалов, в том числе композитных. Выгодное сочетание в композите физико-механических характеристик двух или нескольких материалов обеспечивает необходимые для проектирования конструкций свойства. Известно, что сталь и затвердевший бетон образуют сложный композитный материал — железобетон. В настоящее время налажен промышленный широкомасштабный выпуск неметаллической стеклопластиковой арматуры, которую получают из тонких стекловолокон с помощью связующих пластиков из синтетических смол. Использование наносиликатов обеспечивает получение ультравысокопрочных бетонов с прочностью на сжатие свыше 250 МПа, а применение специальной технологии реактивных порошковых композитов — с гораздо большей прочностью (современные нормативные документы устанавливают расчетные сопротивления на сжатие менее 100 МПа). Современное представление о прочности и деформативных характеристиках материалов основано главным образом на результатах испытаний стандартных образцов материалов: бетона — при осевом нагружении напряжениями сжатия образцов призм, при растяжении образцов в форме восьмерок; арматуры — при испытании образцов на разрывной машине. По опытным данным строят диаграммы деформирования материалов, устанавливающие зависимость напряжений от деформаций, при статическом нагружении образцов вплоть до разрушения. Достоверная оценка данных эксперимента — необходимое условие назначения расчетных сопротивлений материала для предельных состояний по прочности на сжатие (растяжение) и начальных модулей упругости на линейном участке деформирования. Кроме того, эта оценка является критерием истинности принимаемых физических моделей для расчета конструкций [1, 2]. Деформационный метод расчета железобетонных конструкций с использованием диаграмм деформирования стальной арматуры и бетона в последние годы приобрел статус приоритетного [3 – 5]. С накоплением опытных данных в нормативных документах актуализируются значения расчетных сопротивлений арматуры и бетонов по прочности на сжатие и растяжение. Прочность сцепления арматуры с бетоном оценивается сопротивлением выдергиванию арматурного стержня, заделанного в массиве монолитного бетона. Для проведения комплекса испытаний необходимо иметь в наличии пресс на сжатие, пресс

на растяжение с концевыми захватами для арматуры и образцов бетона, стенд для выдергивания арматурного стержня из бетона, а также опалубку для изготовления образцов разной формы.

Для внедрения в практику проектирования новых эффективных композитных материалов необходимо разработать метод оперативного контроля, в том числе в производственных условиях, включающего комплексную методику определения не только прочностных, деформационных характеристик компонентов, а также сил сцепления, обуславливающих их совместную работу под нагрузкой. Кроме того, бетоны после изготовления конструкций при переходе из жидкой в твердую фазу подвергаются усадке, а при наличии связей бетона с арматурой деформации усадки хотя и уменьшаются, но в бетоне возникают собственные напряжения растяжения, в арматуре — напряжения сжатия. При проведении испытаний железобетонных конструкций усадочные деформации и напряжения остаются вне поля зрения экспериментатора. Между тем параметры от нагрузки суммируются с параметрами от усадки бетона, которые оказывают существенное влияние на величину предельных значений напряжений и деформаций материалов. Вопрос учета собственных напряжений от усадки бетона в расчетах железобетонных конструкций остается в настоящее время нерешенным.

На основании экспериментально-теоретических исследований установлено, что для оперативного определения предельных значений деформаций и напряжений непосредственно перед разрушением бетона и последующего построения по аналитическим зависимостям диаграмм деформирования бетона достаточно проводить статические испытания на центральное сжатие и растяжение армированных элементов одного определенного размера (механические характеристики арматуры определяются отдельно). При такой методике исследования сокращаются номенклатура испытательного оборудования, количество форм для изготовления образцов бетона, а по значениям усилий образования и развития трещин в бетоне, когда нарушается совместная работа бетона и арматуры, можно оценить силы сцепления между компонентами и определить значения собственных напряжений и величину деформаций от усадки бетона.

Силовое оборудование и образцы для испытаний. Разработана и изготовлена мобильная установка, позволяющая за счет реверса изменять направление действия нагрузки и испытывать образцы материала как на растяжение, так и на сжатие (рис. 1, а).

Установка для испытаний состоит из четырех плит (траверс), перемещаемых по вертикальным

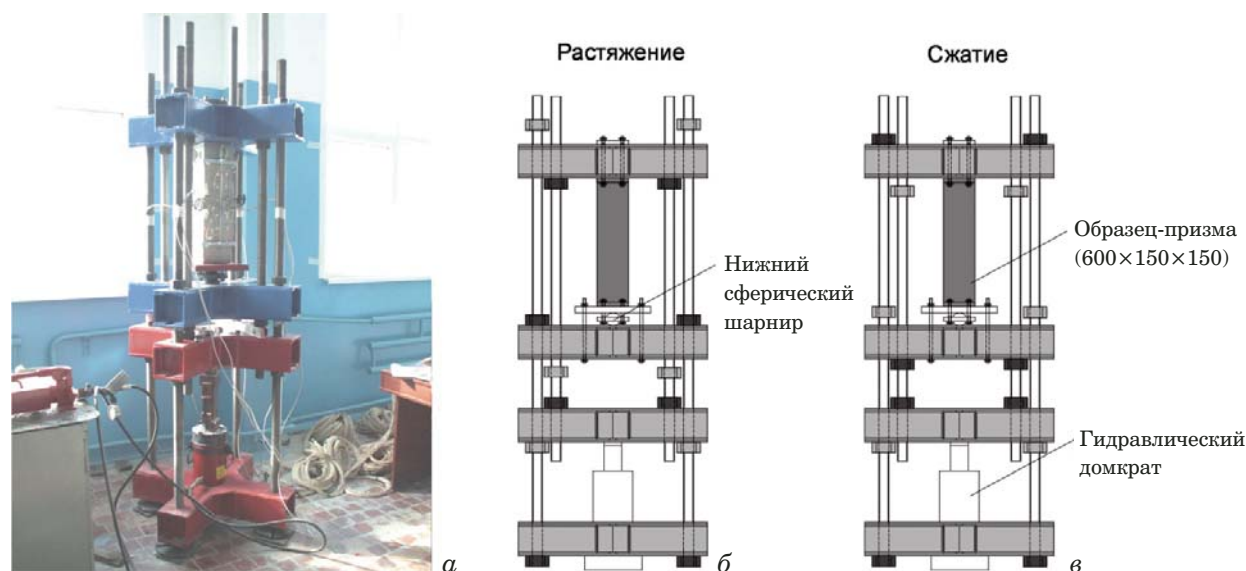


Рис. 1. Общий вид установки (а) и схемы испытаний на растяжение (б) и сжатие (в)

ми тягами, шарнирного механизма и гидравлического домкрата одностороннего действия. Плиты представляют собой перекрестия из двух сваренных в коробчатое сечение швеллеров. Усилие в контуре установки создается гидравлическим домкратом одностороннего действия, который находится между первой и второй плитами. Здесь также устанавливают динамометр осевого сжатия системы ДОС для измерения создаваемого усилия. Железобетонный образец размещают в верхней части установки — между третьей и четвертой плитами. Изменяя положение гаек на тягах относительно траверс, реализуют растяжение (рис. 1, б) или сжатие (рис. 1, в).

Экспериментальные исследования выполняли на железобетонных образцах-призмах (размер сечения 15×15 см, длина 60 см), армированных центральным стальным стержнем. Отношения размеров высоты к сторонам основания, равные 3–4, позволяют в соответствии с принципом Сен-Венана исключить влияние касательных напряжений, вызванных силами трения по опорным граням, на однородное напряженное состояние в исследуемой средней части образцов. Гибкость же образца оказывает влияние только при отношении высоты к стороне его основания, равном не менее восьми. Испытания бетонных призм на сжатие свидетельствуют, что именно в средней (по высоте) части перед разрушением появляются трещины в бетоне (из-за преодоления сопротивления отрыву), распространяющиеся вверх и вниз к опорным граням. Поэтому в исследуемой средней части образца совместная работа бетона обеспечивается только с центральным стержнем. Зона передачи нагрузки у торцов образцов усиливается пространственными карка-



Рис. 2. Армированные образцы

сами с поперечной арматурой, которая сдерживает поперечные деформации и обеспечивает распределение нагрузки на все бетонное сечение (рис. 2).

Центральный стержень и пространственные каркасы соединяют с помощью сварки с металлическими пластинами по торцам образцов, что обеспечивает надежную анкеровку арматурного стержня и исключает влияние дополнительных смещений арматуры относительно бетона на параметры сцепления в исследуемой зоне. Через пластины с помощью приспособлений, образующих шарнирное соединение, образец закрепляют на установке и реализуют его осевое нагружение.

Методика определения и учета напряжений и деформаций от усадки бетона в расчетах железобетонных конструкций. Обозначим ε — общие деформации элемента; ε_{sh} — деформации бетона от усадки; ε_b — силовые деформации бетона от напряжений в бетоне σ_b ; ε_s — силовые дефор-

мации арматуры от напряжений в арматуре σ_s . Зависимости $\varepsilon_b - \sigma_b$ и $\varepsilon_s - \sigma_s$ представляют диаграммами деформирования бетона и арматуры. Аналитическую зависимость для описания диаграмм деформирования [2, 6] запишем в виде

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m \nu_m}, \quad (1)$$

где ε_m , σ_m , E_m — соответственно относительные деформации, напряжения, начальные модули упругости; m — индекс материала (для бетона $m = b$ — при сжатии; $m = bt$ — при растяжении; для арматуры $m = s$); ν_m — коэффициент изменения секущего модуля. Этот коэффициент определяют по формуле

$$\nu_m = \hat{\nu}_m + (\nu_0 - \hat{\nu}_m) \sqrt{1 - \omega_1 \eta - \omega_2 \eta^2}, \quad (2)$$

где ν_0 — начальный коэффициент изменения секущего модуля $E_m \nu_m$; ω_1 , ω_2 — коэффициенты, характеризующие полноту диаграммы материала, причем $\omega_2 = 1 - \omega_1$; $\hat{\nu}_m$ — значение коэффициента ν_m в вершине диаграммы; $\eta = \sigma_m / \hat{\sigma}_m$ — относительный уровень напряжений; в исследованиях рассматривали только восходящую ветвь.

В формулах (1) и (2) при кратковременном одноосном нагружении бетона принимают:

$$\hat{\sigma}_m = \hat{\sigma}_b; \quad \hat{\nu}_m = \hat{\nu}_b = \frac{\hat{\sigma}_b}{\hat{\varepsilon}_b E_b}; \quad \eta = \frac{\sigma_b}{\hat{\sigma}_b}; \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}_m = \hat{\sigma}_{bt}; \quad \hat{\nu}_m = \hat{\nu}_{bt} = 0,6 + 0,15 \frac{\hat{\sigma}_{bt}}{2,5};$$

$$\hat{\varepsilon}_{bt} = \frac{\hat{\sigma}_{bt}}{E_b \hat{\nu}_{bt}}; \quad \eta = \frac{\sigma_{bt}}{\hat{\sigma}_{bt}}. \quad (4)$$

Формулы (3) используют при описании диаграмм бетона на сжатие, формулы (4) — на растяжение; для двух диаграмм: $\nu_0 = 1$, $\omega_1 = 2 - 2,5 \hat{n}_b$.

Общие деформации бетона (или общие деформации элемента с учетом условия совместности деформаций арматуры и бетона)

$$\varepsilon = \varepsilon_{sh} + \varepsilon_b = \varepsilon_{sh} + \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b}; \quad (5)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s \nu_s}, \quad (6)$$

откуда

$$\sigma_b = (\varepsilon - \varepsilon_{sh}) E_b \nu_b, \quad (7)$$

$$\sigma_s = \varepsilon E_s \nu_s. \quad (8)$$

Общие усилия, действующие на элемент,

$$N = \sigma_b A_b + \sigma_s A_s, \quad (9)$$

или с учетом (7) и (8)

$$N = \varepsilon (E_b \nu_b A_b + E_s \nu_s A_s) - \varepsilon_{sh} E_b \nu_b A_b. \quad (10)$$

Общие деформации элемента $\varepsilon = \varepsilon_0$ от усадки бетона, которые принимают за начальные, определяют из уравнения (10) при $N = 0$:

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_{sh} E_b \nu_b A_b}{E_b \nu_b A_b + E_s \nu_s A_s}. \quad (11)$$

Методика экспериментальных исследований и анализ опытных данных. Деформации бетона от усадки ε_{sh} , которые являются максимальными для данного периода времени, определяют опытным путем или расчетами по известным ме-

Таблица 1. Прочностные и деформационные характеристики бетона (образцы-призмы)

Номер серии	$\hat{\sigma}_b$, МПа	$\hat{\varepsilon}_b \cdot 10^5$	$E_b \cdot 10^{-3}$, МПа	$\hat{\sigma}_{bt}$, МПа	$\hat{\varepsilon}_{bt} \cdot 10^5$	$\varepsilon_{sh} \cdot 10^5$	Диаметр арматуры, мм
1	18,9	206	19,0	1,6	12,2	24	16
2	29,3	200	23,0	1,76	11,0	37	20
3	51,1	214	42,0	2,85	8,8	42	20
4	48,3	209	37,5	2,64	8,5	39	20

Таблица 2. Опытные и расчетные параметры деформирования железобетонных элементов при осевом растяжении

№	N_{cre}^{exp} , кН	$-\varepsilon_0 \cdot 10^5$	$\hat{\varepsilon}_{bt,sh} \cdot 10^5$	$\hat{\sigma}_{bt,sh}$, МПа	$\hat{\varepsilon}_{\Delta bt} \cdot 10^5$	$\hat{\sigma}_{\Delta bt}$, МПа	ΔN_{cre} , кН	$\hat{\varepsilon}_{\Delta bt}^{exp} \cdot 10^5$	$\hat{\sigma}_{\Delta bt}^{exp}$, МПа
1	32,5	21,9	1,9	0,32	10,3	1,28	32,8	10,0	1,2
2	25	33,4	3,5	0,79	7,4	0,97	26,0	8,0	1
3	48	39,7	2,1	0,76	6,7	1,92	48,5	7,0	1,9
4	45,5	36,6	2,2	0,71	6,3	1,79	46,0	6,0	1,9

тодикам. В проведенных исследованиях деформации от усадки ε_{sh} измеряли опытным путем на стандартных бетонных образцах-призмах (без армирования) с размерами сечения 15×15 см, длиной 60 см. После стабилизации значений усадочных деформаций на этих образцах определяли прочностные и деформационные характеристики бетона. При осевом сжатии: модуль деформаций бетона — E_b ; предельные значения напряжений $\hat{\sigma}_b$; предельные значения деформаций $\hat{\varepsilon}_b$. При осевом растяжении: предельные значения напряжений $\hat{\sigma}_{bt}$; предельные значения деформаций $\hat{\varepsilon}_{bt}$.

Бетонные и железобетонные образцы с однородными составами бетонной смеси, разделены на четыре серии (табл. 1, 2). Опытные значения параметров бетона представлены в табл. 1, железобетонных образцов, армированных центральными стержнями диаметрами 16 и 20 мм из арматуры класса A400, — в табл. 2.

В процессе испытаний образцов до разрушения напряжениями сжатия или растяжения на каждой ступени статического нагружения по показаниям динамометра фиксировали величину нагрузки N , а по показаниям индикаторов часового типа с ценой одного деления 0,01 мм измеряли на каждой грани образца средние продольные (на базе 300 мм) и поперечные (на базе 150 мм) деформации (рис. 3).

За разрушающую нагрузку принимали ее значение, соответствующее разрушению бетона: с образованием продольных магистральных трещин в средней части — при сжатии и поперечных трещин в исследуемой зоне — при растяжении. В обоих случаях в сечениях с трещинами нагрузка передавалась на арматурный стержень, что сопровождалось скачкообразным увеличени-

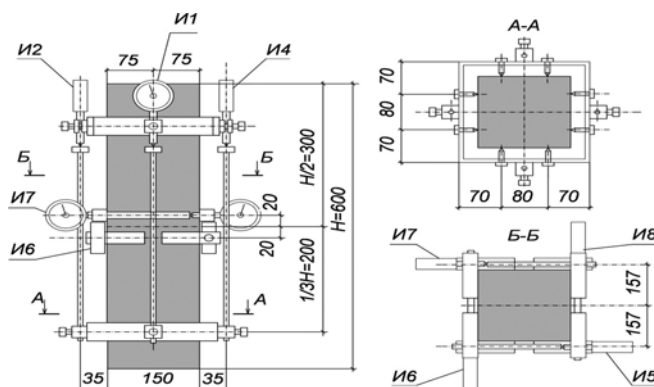


Рис. 3. Схема расположения индикаторов для измерения продольных осевых деформаций (И1, И2, И3, И4) и поперечных деформаций (И5, И6, И7, И8)

ем деформаций металла и нарушением совместной работы бетона и арматуры. Методика испытаний образцов представлена в работе [7].

При осевом сжатии деформации и напряжения от усадки составляют около 1 % от предельных значений, поэтому в расчетах и построениях их можно не учитывать, хотя эффективность бетона от усадки возрастает. Опытные значения усилий и продольных относительных деформаций элемента, замеренных на ступенях статического нагружения, представляют в координатных осях $N - \varepsilon_{bt}$ (рис. 4, а). Предельные деформации бетона в железобетонном элементе $\hat{\varepsilon}_{bt}^{exp}$ (см. табл. 2), замеренные непосредственно перед образованием трещин, на 25 – 30 % меньше их опытных значений $\hat{\varepsilon}_{bt}$ (табл. 1), полученных при испытаниях аналогичных бетонных образцов.

По результатам испытаний бетонных образцов (без арматуры) строили диаграммы на растяжение $\varepsilon_{bt} - \sigma_{bt}$ (рис. 4, в), где $\varepsilon_{bt} = \varepsilon - \varepsilon_{sh}$. Вначале

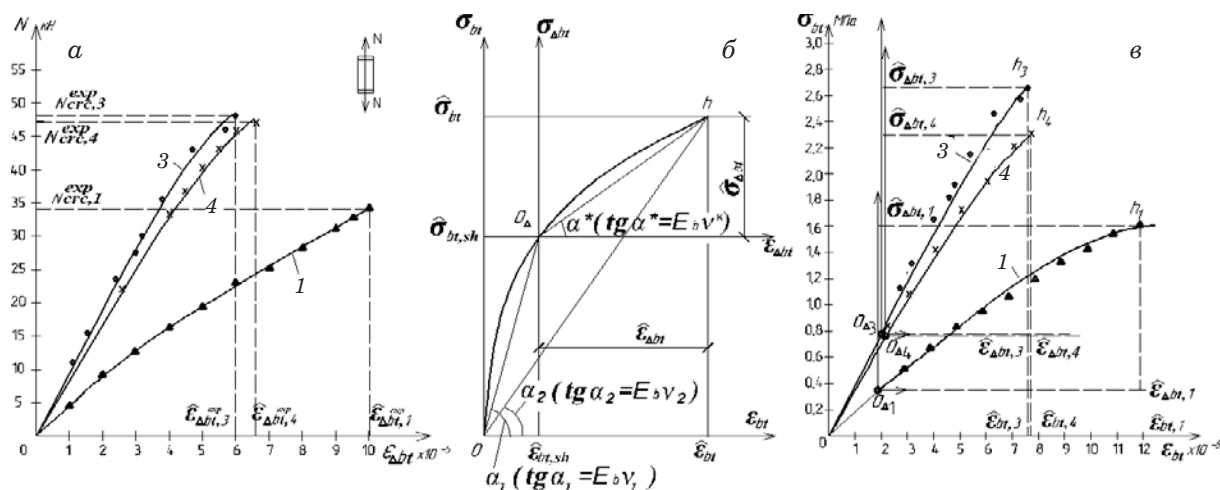


Рис. 4. Опытные графики увеличения осевых деформаций при статическом нагружении нагрузкой растяжения и их предельные значения при разрушении образцов (а), диаграмма растяжения в приращениях (б), диаграммы на растяжение с учетом деформаций и напряжений от усадки бетона (в); сплошные линии — расчет, значки — опытные данные; 1, 3, 4 — номера серий образцов

полагали, что армирование не влияет на усадку и в армированных образцах величинам $(\varepsilon - \varepsilon_{sh})$ соответствуют те же напряжения в бетоне, что и в неармированных. Напряжения в арматуре определяли по общим деформациям $\varepsilon = \varepsilon_s$. Подставляя опытные значения $\sigma_{b,bt}$ и σ_s в уравнение (9), проверяли выполнение равенства правой части уравнения значениям усилий N в армированных образцах.

Расчет упрощается, если деформации и напряжения от нагрузки в виде конечных приращений $\varepsilon_{\Delta bt}$ и $\sigma_{\Delta bt}$ отсчитываются в новой системе координат. Начало новой системы координат, например при растяжении, переносится относительно исходной на величину конечных значений деформаций $\hat{\varepsilon}_{bt,sh}$ и напряжений $\hat{\sigma}_{bt,sh}$ от усадки бетона: из точки O в точку O_{Δ} (рис. 4, б); из точки O в точки $O_{\Delta 1}$, $O_{\Delta 3}$, $O_{\Delta 4}$ (рис. 4, в). Их значения (см. табл. 2) вычисляют по формулам

$$\hat{\varepsilon}_{bt,sh} = k_{sh}(\varepsilon_0 - \varepsilon_{sh}); \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_{bt,sh} = \hat{\varepsilon}_{bt,sh} \hat{\nu}_{bt,sh} E_b, \quad (13)$$

где ε_0 рассчитывают по формуле (11); ε_{sh} подставляют со своим знаком; $k_{sh} = 0,9$ — коэффициент, понижающий конечные значения деформаций от усадки с учетом интервала по времени от изготовления образцов до начала совместной работы бетона и арматуры [8].

Чем больше усадочные напряжения в бетоне, тем короче ветвь $O_{\Delta}h$ и меньше усилие образования трещин N_{crc} . С ростом нагрузки N бетон и арматура деформируются совместно. Приращения деформаций $\varepsilon_{\Delta bt}$ и $\varepsilon_{\Delta s}$ равны приращениям деформаций железобетонного образца ε_{Δ} . Этим деформациям на диаграммах соответствуют конкретные величины приращений напряжений $\sigma_{\Delta bt}$ и $\sigma_{\Delta s}$. Связь между приращениями напряжений и деформаций записывается в виде

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\sigma_{\Delta bt}}{E_b \nu^k} = \frac{\sigma_{\Delta s}}{E_s \nu_s}, \quad (14)$$

где ν^k — условный коэффициент касательного модуля деформаций бетона ($E_b \nu^k$), который выражается через коэффициент секущего модуля в начале и конце отсчета приращений (шага нагружения).

Определим значения $\nu^k = \hat{\nu}_k$, когда деформации и напряжения увеличиваются от их усадочных величин (12) и (13) до предельных значений $\hat{\varepsilon}_{bt}$ и $\hat{\sigma}_{bt}$ (см. табл. 1) в вершине h диаграммы. Переход от точки O_{Δ} в точку h (см. рис. 4, б) осуществляется по хорде $O_{\Delta} - h$, при этом условный коэффициент касательного модуля ν^k выражается через коэффициент секущего модуля в начале ν_1

(точке O_{Δ}) и конце ν_2 (точке h) шага нагружения по методике конечных приращений [9]:

$$\hat{\nu}_k = \frac{\hat{\varepsilon}_{bt} \nu_2 - \hat{\varepsilon}_{bt,sh} \nu_1}{\hat{\varepsilon}_{\Delta bt}}, \quad (15)$$

где ν_1 и ν_2 вычисляют по формулам (2) и (4); $\hat{\varepsilon}_{\Delta bt} = \hat{\varepsilon}_{bt} - \hat{\varepsilon}_{bt,sh}$.

В приращениях уравнение (9) для общих усилий принимает вид

$$N = \varepsilon_{\Delta} (E_b \nu^k A_b + E_s \nu_s A_s). \quad (16)$$

При подстановке в уравнение (16) параметров диаграмм бетона и арматуры вычисляем N и при соответствующих $\varepsilon_{\Delta} = \varepsilon_{\Delta bt}$ строим диаграммы $\varepsilon_{\Delta bt} - N$, которые удовлетворительно описывают опытные данные (см. рис. 4, а), полученные при испытаниях железобетонных элементов. При $\varepsilon_{\Delta} = \hat{\varepsilon}_{\Delta bt}$ и $\nu^k = \hat{\nu}^k$ из уравнения (16) находим значения усилий трещинообразования $N = N_{crc}$, при которых в образце образуются поперечные трещины. Расчетные значения усилий трещинообразования N_{crc} , вычисленные с учетом усадочных напряжений и деформаций, незначительно отличаются от опытных данных N_{crc}^{exp} (табл. 2). Опытные значения предельных деформаций $\hat{\varepsilon}_{\Delta bt}^{exp}$ непосредственно перед образованием в бетоне железобетонных элементов поперечных трещин соответствуют расчетным $\hat{\varepsilon}_{\Delta bt}$ (см. табл. 2). Следовательно, в расчетах железобетонных конструкций на растяжение можно принять, что усадка не зависит от армирования. При растяжении усилие трещинообразования в бетоне за счет усадочных напряжений значительно уменьшается, что необходимо учитывать в расчетах железобетонных конструкций [10, 11].

Таким образом, для оперативного контроля качества железобетонных конструкций рекомендуется проводить экспериментальные исследования при центральном нагружении напряжениями сжатия и растяжения на армированных бетонных образцах. По опытным значениям усилий и деформаций, замеренным перед разрушением бетона, из условия совместности деформаций бетона и арматуры вычисляют предельные значения напряжений, а по предложенным аналитическим выражениям — фактические напряжения и деформации от усадки бетона и строят диаграммы деформирования бетона на растяжение и сжатие. Если в расчетах железобетонных элементов на сжатие усадку в силу ее незначительного влияния можно не учитывать, то в расчетах на растяжение без учета усадки усилия трещинообразования могут оказаться завышенными на 25–30 %, поэтому диаграммы материалов необходимо корректи-

ровать, полагая, что усадка не зависит от армирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Акимов П. А.** О развитии дискретно-континуального подхода к численному моделированию состояния несущих систем высотных зданий / Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 16 – 20.
2. **Карпенко Н. И.** Общие модели механики железобетона. — М.: Стройиздат, 1996. — 416 с.
3. **Мурашкин Г. В., Мордовский С. С.** Применение диаграмм деформирования для расчета несущей способности внецентренно сжатых железобетонных элементов / Жилищное строительство. 2013. № 3. С. 38 – 40.
4. **Травуш В. И., Колчунов В. И., Клюева Н. В.** Некоторые направления развития теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений / Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 4 – 11.
5. **Федоров В. С., Баширов Х. З.** Методика расчета прогиба составных железобетонных конструкций / Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 21 – 28.
6. **Карпенко Н. И., Ерышев В. А., Латышева Е. В.** К построению диаграмм деформирования бетона повторными нагрузками сжатия при постоянных уровнях напряжений / Строительные материалы. 2013. № 6. С. 48 – 52.
7. **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 Тольяттинского государственного университета. 2010. № 3. С. 51 – 56.
8. **Карпенко Н. И., Ерышев В. А., Латышева Е. В., Бондаренко А. С.** Деформации железобетонного элемента с учетом усадочных деформаций / Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета, Сер. Строительство и архитектура. 2013. № 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 344 – 358.
9. **Карпенко Н. И., Карпенко С. Н., Петров А. Н., Палювина С. Н.** Модель деформирования железобетона в приращениях и расчет балок-стенок и изгибаемых плит с трещинами. — Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. — 156 с.
10. **Бондаренко В. М., Колчунов В. И.** Расчетные модели силового сопротивления железобетона: Монография. — М.: Издательство АСВ, 2004. — 472 с.

11. **Karpenko N. I., Eryshev V. A., Latysheva E. V.** Stress-strain Diagrams of Concrete Under Repeated Loads with Compressive Stresses / Procedia Eng. 2015. Vol. 111. P 371 – 377.

REFERENCES

1. **Akimov P. A.** On the development of discrete-continuous approach to the numerical modeling of load-bearing systems of high-rise buildings / Promyshl. Grazhd. Stroit. 2015. N 3. P 16 – 20 [in Russian].
2. **Karpenko N. I.** General models of the mechanics of reinforced concrete. — Moscow: Stroiizdat, 1996. — 416 p. [in Russian].
3. **Murashkin G. V., Mordovskii S. S.** Application diagrams of deformation to calculate the bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements / Zhilishch. Stroit. 2013. N 3. P 38 – 40 [in Russian].
4. **Travush V. I., Kolchunov V. I., Klyueva N. V.** Some directions of development of the theory of survivability of structural systems of buildings and structures / Promyshl. Grazhd. Stroit. 2015. N 3. P 4 – 11 [in Russian].
5. **Fedorov V. S., Bashirov Kh. Z.** Method of calculating the deflection of composite concrete structures / Promyshl. Grazhd. Stroit. 2015. N 3. P 21 – 28 [in Russian].
6. **Karpenko N. I., Eryshev V. A., Latysheva E. V.** To the construction of the deformation diagrams of concrete by repeated load compression at constant stress levels / Stroit. Mater. 2013. N 6. P 48 – 52 [in Russian].
7. **Eryshev V. A., Latysheva E. V., Bondarenko A. S.** An experimental Method of stress-strain state of a linear reinforced concrete elements under axial load case of repeated and alternating loads / Vektor Nauki Tol'yat. Gos. Univ. 2010. N 3. P 51 – 56 [in Russian].
8. **Karpenko N. I., Eryshev V. A., Latysheva E. V., Bondarenko A. S.** Deformation of reinforced concrete elements considering shrinkage deformation / Vestn. Volgograd. Gos. Arkhitekt.-Stroit. Univ. Ser. Stroit. Arkhitekt. 2013. N 31(50). Part 2. Stroit. Nauki. P 344 – 358 [in Russian].
9. **Karpenko N. I., Karpenko S. N., Petrov A. N., Palyuvinna S. N.** The model of deformation of reinforced concrete in increments and calculation of deep beam and bending plates with cracks. — Petrozavodsk: Izd. PetrGU, 2013. — 156 p. [in Russian].
10. **Bondarenko V. M., Kolchunov V. I.** Analysis model force resistance of reinforced concrete. — Moscow: Izd. ASV, 2004. — 472 p. [in Russian].
11. **Karpenko N. I., Eryshev V. A., Latysheva E. V.** Stress-strain Diagrams of Concrete Under Repeated Loads with Compressive Stresses / Procedia Eng. 2015. Vol. 111. P 371 – 377.