

УДК 624.012.454:669.018

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
С ПРОДОЛЬНОЙ НАПРЯГАЕМОЙ ВЫСОКОПРОЧНОЙ АРМАТУРОЙ**

*канд. техн. наук, доц. Ю.В. ПОПКОВ, Ю.А. СЛУЦКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Рассмотрено применение в железобетонных элементах высокопрочных сортов стержневой стали при условии рационального использования ее механических свойств, обеспечивающее значительное снижение материалоемкости и повышение экономической эффективности конструкции. Показана необходимость всестороннего изучения работы таких конструкций при разных видах нагружения и совершенствования методов их расчета и проектирования для успешного внедрения в массовом строительстве.*

Нормами проектирования железобетонных конструкций расчётные сопротивления арматуры сжатию устанавливаются в зависимости от двух факторов: расчётного сопротивления растяжению и предельной сжимаемости бетона.

Для мягких сталей деформация, отвечающая пределу текучести (расчётному сопротивлению), меньше предельной деформации бетона при сжатии. Расчётное сопротивление сжатию обусловлено деформационными и прочностными свойствами арматурной стали. Исходя из этого расчётное сопротивление арматуры сжатию принято равным расчётному сопротивлению арматуры растяжению, определённое с требуемой обеспеченностью и с учётом возможной изменчивости предела текучести. Для высокопрочных сталей сопротивление сжатию связано с предельной сжимаемостью бетона.

Деформативность бетона при наличии его сцепления с арматурой характеризует распределение полного усилия в железобетонном элементе по мере роста нагрузки. Степень вовлечения арматуры в совместную работу с бетоном различна на разных уровнях нагружения и ограничивается предельным значением деформации бетона, которое может быть достигнуто к моменту потери бетоном несущей способности.

Анализ закономерностей изменения предельной деформативности бетонов в условиях осевого сжатия  $\varepsilon_c$  при кратковременном нагружении, выполненный в работах О.Я. Берга, Е.Н. Щербакова, Г.Н. Писанко, Б.Я. Рискинда, Е.А. Чистякова и других [1 - 4], показал тесную корреляционную связь между  $\varepsilon_c$  и призменной прочностью бетона  $f_c$ . В общем случае при одинаковом режиме нагружения указанная зависимость отражает возрастание предельной сжимаемости с увеличением прочности бетона и достаточно точно аппроксимируется линейной функцией, но носит неоднозначный характер, обусловленный влиянием технологических параметров, не связанных непосредственно с прочностью бетона [1]. Наибольшие значения  $\varepsilon_c$  достигают величины  $(200 - 250) \cdot 10^{-5}$ .

Предельная деформация бетона при неоднородных напряженных состояниях (внецентренное сжатие, сжатие при изгибе) существенно отличается от предельной деформации, соответствующей осевому сжатию за счет влияния соседних, менее напряженных, участков сжатой зоны. Отношение предельных деформаций внецентренно сжатых и центрально сжатых бетонных призм (по опытным данным) изменяется в пределах от 1,6 до 1,95. В этом случае наиболее напряженные волокна работают в зоне нисходящего участка кривой « $a_c - e_c$ » и поэтому претерпевают значительные деформации. Такое явление особенно сильно выражено в низкопрочных бетонах.

Аналогичным образом влияет также арматура, вследствие чего предельные деформации армированных элементов выше, чем неармированного бетона, и зависят от степени армирования и класса стали. В работе [5] при исследовании жестких центрально сжатых железобетонных элементов предельные деформации составили  $(390 - 400) \cdot 10^{-5}$ . Более высокие значения предельной деформативности армированных центрально сжатых элементов отмечены и в других работах.

При неравномерном распределении напряжений по сечению железобетонного элемента предельные деформации существенно отличаются от величин, полученных при центральном сжатии. По данным работ предельные деформации наиболее сжатой грани сечения элементов достигали значений  $(300 - 700) \cdot 10^{-5}$ . Обобщённые сведения о предельных деформациях укорочения бетона внецентренно сжатых железобетонных элементов приводятся в работах [6, 7], где в качестве основных влияющих факторов деформативности бетона представлены: прочность и неупругие свойства бетона, высота сжатой зоны и форма сечения. В отличие от центрального сжатия бетонных призм, при внецентренном сжатии предельные деформации, изменяясь в пределах от  $200 \cdot 10^{-5}$  до  $550 \cdot 10^{-5}$ , уменьшаются с ростом прочности бетона.

Изучению сжатых железобетонных элементов с высокопрочной продольной арматурой и поперечным армированием различной интенсивности посвящены работы, выполненные в НИИЖБе, УралНИИСтройпроекте, Челябинском ПромстройНИИпроекте и других, согласно которым предельные деформации бетона в центрально сжатых элементах достигали значений  $(300 - 600) \cdot 10^{-5}$ .

Особое место в исследованиях по данному направлению занимают результаты, полученные Б.Я. Рискиндо, Е.А. Чистяковым, В.В. Суриным, при изучении работы центрально и внецентренно сжатых железобетонных элементов с продольной арматурой разной прочности и поперечной арматурой в виде

хомутов, установленных в минимальном количестве, но достаточном для обеспечения устойчивости продольных стержней. Опытные образцы колонн из бетонов с призменной прочностью от 21 до 64,5 МПа армировались продольной арматурой классов S400, S1000, S1200 и испытаны при начальных относительных эксцентриситетах  $e/h = 0,4 - 1,1$ . Установлено, что предельные деформации бетона при центральном сжатии образцов с термоупрочненной сталью достигали значений  $(250 - 525) \cdot 10^{-5}$ , а с горячекатаной при прочих равных условиях –  $(180 - 380) \cdot 10^{-5}$ . Предельные деформации внецентренно сжатых элементов с горячекатаной арматурой достигали  $(320 - 410) \cdot 10^{-5}$ , а с термоупрочненной –  $(450 - 750) \cdot 10^{-5}$ .

Вышеперечисленные опыты показывают, что фактические значения предельных деформаций бетона колеблются в довольно широких пределах (от  $200 \cdot 10^{-5}$  до  $750 \cdot 10^{-5}$ ) и зависят от физико-механических свойств бетона, скорости нагружения, вида напряженного состояния, формы сечения, наличия арматуры, характера армирования и класса стали.

Анализируя закономерности изменений предельной деформативности, целесообразно принять во внимание полную диаграмму «напряжения – деформации» бетона. Полная диаграмма сжатия бетона позволяет объяснить причины изменений величины предельной деформации сжатия бетона. Кривая зависимости « $\sigma_c - \varepsilon_c$ » имеет две характерные точки:  $\varepsilon_c$  – предельная деформация при наибольшей нагрузке и  $\varepsilon_{cu}$  – предельная деформация в конце нисходящего участка. Положения этих точек зависят от прочности бетона. При увеличении прочности значения  $\varepsilon_c$  увеличиваются, а значения  $\varepsilon_{cu}$  уменьшаются. Аналогичная зависимость прослеживается и в опытах со сжатыми железобетонными элементами.

Экспериментальные исследования, проведенные в США на фрагментах – моделях многоярусных рам, показали, что колонны в таких условиях обладают значительной способностью к пластическому деформированию на ниспадающей ветви полной диаграммы « $\sigma_c - \varepsilon_c$ ». Предельные деформации бетона при сжатии составили  $(960 - 1600) \cdot 10^{-5}$ .

Проведенный обзор опытных данных о деформативности бетона показывает, что величина предельной деформации должна оцениваться полной диаграммой сжатия, характеризующей нисходящим участком, протяженность которого зависит от целого ряда факторов. Необходимость изучения предельной деформации в конце нисходящего участка диаграмм имеет не только теоретическое значение, но и важное с точки зрения возможности рационального использования высокопрочной арматуры.

Из вышеизложенного видно, что предельная деформативность бетона зависит от его вида и прочности, поперечного армирования, вида напряженного состояния, формы сечения и скорости нагружения, от количества продольной арматуры и характера диаграммы растяжения. Чем больше содержание высокопрочной арматуры, тем выше предельные деформации бетона при разрушении. Это связано с перераспределением усилий, воспринимаемых бетоном и арматурой. Проявление неупругих деформаций бетона приводит к увеличению напряжений упруго работающей арматуры.

Полученные ранее данные о характере работы на сжатие арматурных стержней различной гибкости и классов прочности весьма ограничены и не позволяют в полной мере оценить действительные условия деформирования их в расчетной прочности конструкций.

Для решения вопроса о назначении предельных напряжений в арматуре сжатой зоны проведен анализ опытных данных исследований сопротивления высокопрочных стержней сжатию в железобетонных образцах [8, 9], а также результатов сравнения механических характеристик арматуры различных классов по результатам их испытания как отдельных стержней на сжатие и растяжение.

Экспериментальные исследования проводились на образцах арматурной стали различной гибкости с максимально возможным приближением рабочей длины образца по шагу поперечных стержней (хомутов) в сжатых элементах конструкций. Анализ характера разрушения сжатой зоны железобетонных конструкций, сопровождаемого выпучиванием арматурных стержней между точками закрепления их хомутами, показывает, что форма искривления стержней подобна форме потери устойчивости при жестком защемлении концов. Рабочая длина арматурных стержней назначалась исходя из конструктивных требований норм проектирования, т.е. в диапазоне 10-20 диаметров поперечного сечения образцов. Образцы изготавливались из арматурной стали классов S400, S500 и S800, взвешивались для определения приведенного диаметра и испытывались на растяжение по стандартной методике. Передача сжимающих усилий на образцы, жесткое закрепление концов, установка в перпендикулярное положение их продольной оси по отношению к плоскости передачи нагрузки осуществлялось в специально изготовленных стальных опорных подушках. Центровка образцов и испытания нагружением проводились в гидравлических прессах П-125 и МС-100.

Нагрузки на образцы возрастала ступенями (по 10 % от предельной) со средней скоростью не более 10 мПа/с с выдержкой на каждом этапе не более 10 с. Проверка центровки образцов на начальных этапах измерения продольных деформаций арматурных стержней проводилась механическими рычажными тензометрами с точностью  $5 \cdot 10^{-5}$  относительных единиц (цена деления  $1 \cdot 10^{-3}$  мм на базе измерений 20 мм). Контроль деформаций осуществлялся до момента начала потери устойчивости образцов, что фиксировалось также по стрелке силоизмерителя пресса.

Результаты исследований работы арматуры на сжатие в виде отдельных стержней, испытанных на сжатие (рис. 1 - 3), показали, что предельные сжимающие напряжения зависят от гибкости стержней и класса стали.

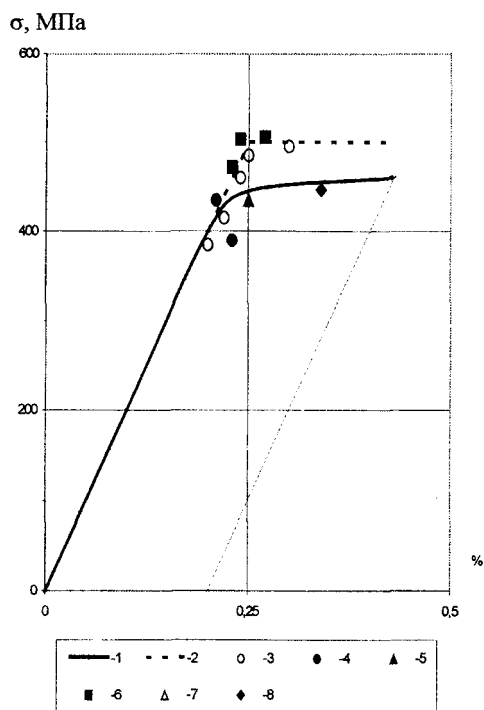


Рис. 1. Результаты испытаний стержней класса S400 и S500:

- 1 – диаграмма деформирования при растяжении; 2 – диаграмма деформирования при сжатии;
- 3 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 35$  [8, 9]; 4 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 44$  [8, 9]; 5 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 50$  [8, 9];
- 6 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 20$  (по нашим данным);
- 7 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 23$  (по нашим данным);
- 8 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 25$  (по нашим данным)

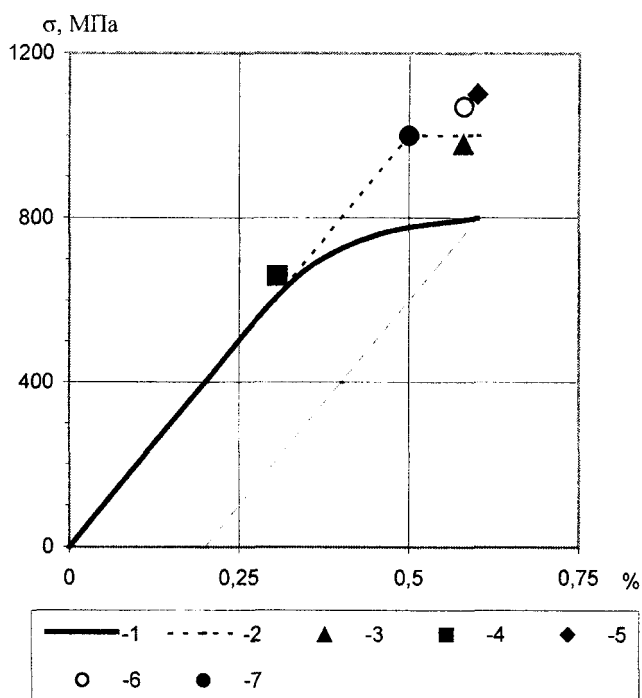


Рис. 2. Результаты испытаний стержней класса S800:

- 1 – диаграмма деформаций при растяжении; 2 – диаграмма деформаций при сжатии;
- 3 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 27$  [8, 9]; 4 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 55$  [8, 9]; 5 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 20$  (данные автора);
- 6 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 30$  (по нашим данным);
- 7 – предельные сжимающие напряжения в арматуре при  $\lambda = 40$  (по нашим данным)

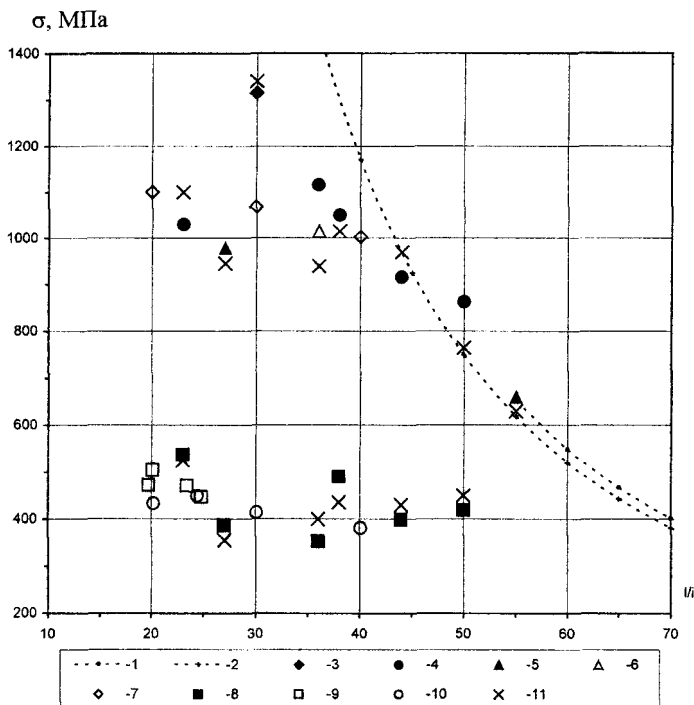


Рис. 3. Предельные напряжения в арматурных стержнях при сжатии:

- 1 - предельные (критические) напряжения по формуле Эйлера для стержней класса S400;
- 2 - предельные (критические) напряжения по формуле Эйлера для стержней класса S600 и выше;
- 3 - предельные сжимающие напряжения в арматуре класса S1200 опытных конструкций [9];
- 4 - стержни класса S1000 [8,10]; 5 - стержни класса S800 [8, 10];
- 6 - предельные сжимающие напряжения в арматуре класса S800 опытных конструкций [2];
- 7 - стержни класса S800 (данные автора); 8 - стержни класса S400 [8, 10];
- 9 - стержни класса S400 (данные автора); 10 - стержни класса S400 (данные автора);
- 11 - расчётные предельные сжимающие напряжения по формуле (1)

Стержни арматуры класса S400 независимо от гибкости теряли устойчивость при напряжениях, примерно равных пределу текучести стали. Стержни из высокопрочной арматуры классов S800 и S1000 теряли устойчивость при напряжениях, превышающих условный предел текучести, что в существенной мере зависит от гибкости. Критические напряжения при потере устойчивости стержня, могут быть определены по линейной зависимости для области упругопластических деформаций:

$$\sigma_{sc.u} = \sigma_u \cdot \left( 1,2 - 0,2 \cdot \frac{\lambda_s}{\lambda_{s.lim}} \right), \tag{1}$$

где  $\sigma_u$  – временное сопротивление разрыву для сталей с условным пределом текучести или предел текучести для сталей с физическим пределом текучести;  $\lambda_{s.lim}$  – предельная гибкость стержня для упругой области шарнирно опертого стержня (по Эйлеру);  $\lambda_s$  – расчетная (приведенная) гибкость стержня, определяемая по формуле:

$$\lambda_s = \frac{\mu_{sw} \cdot U_{sw}}{r}, \tag{2}$$

здесь  $\mu_{sw}$  – коэффициент приведенной длины стержня;  $U_{sw}$  – шаг поперечных стержней арматурного каркаса;  $r$  – радиус инерции поперечного сечения арматурного стержня.

Зависимость (1) дает удовлетворительную для практических расчетов сходимость опытных и расчетных (см. рис. 3) значений предельных напряжений в сжатой арматуре для различных классов стали, на основании чего можно рекомендовать для расчетов  $\sigma_{si} > -\sigma_{sc.u}$ .

Следовательно, при внецентричном сжатии железобетонных элементов предельные деформации и напряжения в высокопрочной стержневой арматуре следует рассматривать как переменные величины, зависящие, кроме прочего, от устойчивости стержней продольной арматуры, что учитывается в предлагаемых расчетных формулах.

Для гармонизации отечественных норм с нормами Европейского комитета по бетону МС-90, Еврокода-2 и нормами других наиболее развитых стран в практику проектирования внедряется деформа-

ционный метод, основой которого является расчетная модель напряженно-деформированного состояния сечения, устанавливающая в качестве обобщенных характеристик механических свойств бетона и арматуры диаграммы деформирования материалов.

Рассматриваемая в данной работе расчетная оценка прочности сжатых железобетонных элементов с высокопрочной ненапрягаемой арматурой основывается на принципиальных положениях этого метода и заключается в использовании гипотезы плоских сечений, полных диаграмм деформирования бетона и арматуры. При этом связь между напряжениями и деформациями сжатого бетона в общем случае определяется с учетом напряженно-деформированного состояния элементов, т.е. принимается трансформированной по сравнению с диаграммой при центральном сжатии.

Поперечное сечение рассматривается в виде дискретной модели, состоящей из элементарных участков-полос в количестве от 1 до  $m$  (рис. 4). При этом принимается, что в пределах каждого участка напряжения одинаковы и равны напряжению в центре его тяжести.

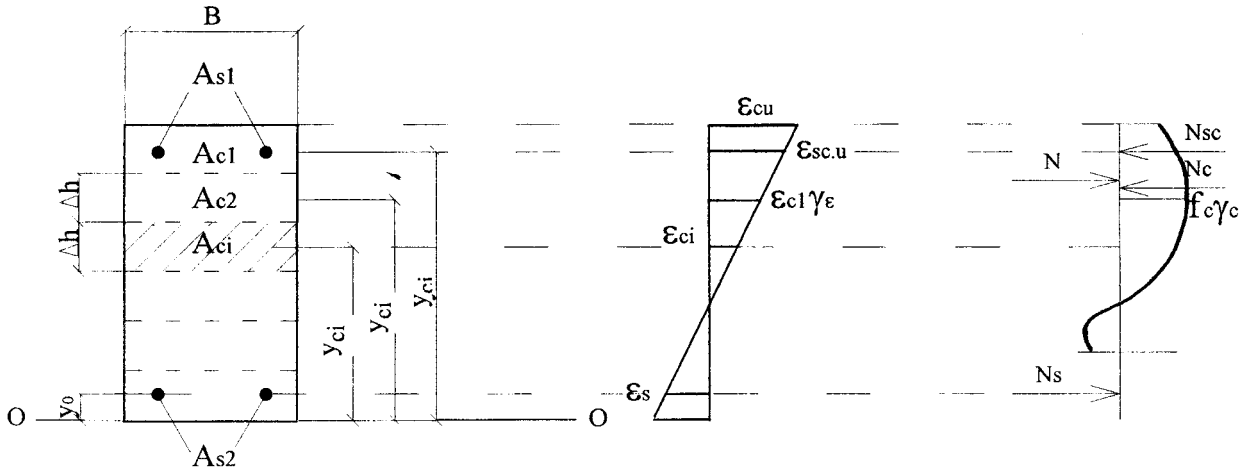


Рис. 4. Расчётная схема деформаций, напряжений и усилий в нормальном сечении железобетонного элемента

Деформации бетона на соответствующих участках и деформации арматуры определяются с учетом их линейного распределения по высоте сечения элемента и расположения моментной оси « $O - O$ » согласно рис. 4 по формулам:

$$\epsilon_{ci} = \epsilon_c - \frac{1}{r} \cdot (h - y_{ci}); \tag{3}$$

$$\epsilon_{sk} = \epsilon_c - \frac{1}{r} \cdot (h - y_{sk}), \tag{4}$$

где  $y_{ci}$ ,  $y_{sk}$  – расстояние от моментной оси до центров тяжести элементарных площадок бетона и стержневой арматуры, соответственно;  $\frac{1}{r}$  – кривизна элемента;  $\epsilon_c$  – относительные деформации наиболее сжатой грани сечения.

Если деформации бетона какого-либо участка  $\epsilon_{ci} > 0$  (деформация удлинения), то для этого участка принимается  $\epsilon_{ci} = 0$ , так как работа растянутого бетона в расчете не учитывается.

По напряжениям в бетоне ( $\sigma_{ci}$ ) в центре тяжести  $i$ -го участка и напряжениям в  $k$ -том арматурном стержне ( $\sigma_{Sk}$ ) определяются внутренние усилия в сечении:

$$N + \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} + \sum_{k=1}^m \sigma_{Sk} \cdot A_{Sk} = 0; \tag{5}$$

$$N \cdot e + \sum_{i=1}^n \sigma_{ci} \cdot A_{ci} \cdot y_{ci} + \sum_{k=1}^m \sigma_{Sk} \cdot A_{Sk} \cdot y_{Sk} = 0, \tag{6}$$

где  $N$  – разрушающая (максимальная) продольная сила;  $e$  – расстояние от линии действия силы  $N$  до выбранной моментной оси « $O - O$ » с учетом прогиба элемента  $f$ ;  $A_{ci}$  – площадь элементарного участка бетона;  $A_{Sk}$  – площадь сечения стержня арматуры или группы стержней.

При размещении моментной оси «О - О» на растянутой или менее сжатой грани сечения расстояния от этой оси до центров тяжести элементарных площадок бетона определяются по формуле:

$$y_{ci} = h - (i - 0,5) \cdot \Delta h, \quad (7)$$

а расстояния до центров тяжести арматурных стержней – по формулам:

$$y_{sk} = h - a^1; \quad y_S = a. \quad (8)$$

Площади бетонных участков определялись, как для прямоугольных сечений:

$$A_{ci} = b \cdot \Delta h = b \cdot \frac{h}{n}. \quad (9)$$

Расстояние от выбранной оси до точки приложения силы  $N$  вычислялось по условию:

$$e = \frac{h}{2} + e_0 + f, \quad (10)$$

где  $e_0$  – начальный эксцентриситет;  $f$  – прогиб элемента в предельной стадии, определяемый по известной зависимости:

$$f = \frac{1}{r} \cdot \frac{l_0^2}{K_p}, \quad (11)$$

где  $\frac{1}{r}$  – кривизна элемента в наиболее напряженном сечении;  $l_0$  – длина элемента или расстояние между шарнирными опорами;  $K_p$  – коэффициент, учитывающий распределение кривизны по длине элемента.

В настоящее время имеется немало предложений по описанию диаграмм деформирования бетона (в виде полиномов, степенных функций, показательных функций и других зависимостей). Та или иная зависимость может быть выбрана с учетом особенностей решаемой задачи. В данном случае использована несколько видоизмененная зависимость ЕКБ – ФИП (рис. 5):

$$\sigma_c = \frac{K \cdot \eta - \eta^2}{1 + (K - 2) \cdot \eta} \cdot f_c, \quad (12)$$

где

$$K = \frac{E_c \varepsilon_{cl}}{f_c}; \quad (13)$$

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}}; \quad (14)$$

$$\varepsilon_{cl} = f_c \left( 0.12 + \frac{16,8}{f_c} \right) \cdot 10^{-4}. \quad (15)$$

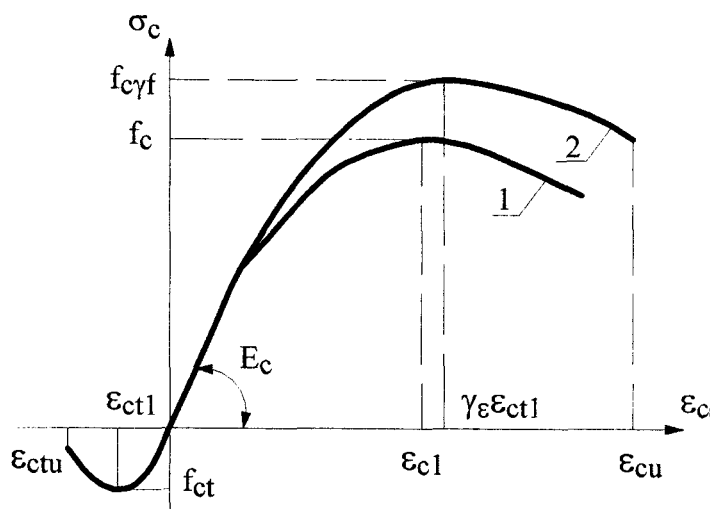


Рис. 5. Диаграмма деформирования бетона:

1 - центральное сжатие; 2 - сжатие в условиях неоднородного напряжённого состояния

Ряд исследователей считают, что диаграмма «напряжение - деформация» бетона, полученная при испытании призм на осевое сжатие, наилучшим образом отвечает работе бетона в изгибаемых и внецентренно сжатых элементах. В то же время имеется немало исследований, результаты которых позволяют предположить обратное. Еще в 1936 г. на основании опытных данных для изгибаемых и внецентренно сжатых элементов ЦНИИПС ввел понятие предела прочности на сжатие при изгибе  $R_u = 1,25 R_b$ , который принимался в нормативной методике расчета до 1975 г.

Однако в связи с тем, что в некоторых случаях отмечалась переоценка несущей способности, в дальнейшем рекомендовано для всех случаев использовать величину  $R_b$ . Это явилось следствием консервативности условной прямоугольной формы эпюры напряжений в сжатой зоне бетона, которая не позволяет учитывать трансформацию фактической эпюры напряжений в сжатом бетоне под влиянием различных факторов. Повышение прочности бетона объясняется [1] особенностями развития микротрещинообразований и наличием градиента деформаций соседних волокон при неоднородном напряженном состоянии сжатой зоны изгибаемых и внецентренно сжатых элементов, что должно учитываться в расчетной оценке прочности конструкций.

Диаграмма деформирования арматуры принята трехлинейного вида (рис. 6).

На основании результатов экспериментов предлагается рассматривать различные диаграммы для сжатой и растянутой арматуры в области неупругого деформирования, т.е. при  $\sigma_s > \sigma_{s1}$ .

Увеличение сжимающих напряжений в арматуре связано с кривизной элемента в стадии потери устойчивости. К аналогичному заключению пришли также авторы, установившие корреляционную зависимость напряжений в арматуре, кроме прочих факторов, от гибкости сжатой железобетонной конструкции и, следовательно, от ее кривизны. На основании анализа экспериментов установлено, что при кривизне стойки, отвечающей условию

$$\frac{1}{r} \geq 4,5 \cdot 10^{-5}, \tag{16}$$

устойчивость наиболее сжатых арматурных стержней повышается, благодаря чему увеличивается их сопротивление сжатию в предельной стадии железобетонного элемента.

При деформациях сжатия бетона на уровне центра тяжести площади сечения арматурных стержней, расположенных у наиболее сжатой грани элемента, превышающих деформации  $\varepsilon_{s1}$ , соответствующие пределу пропорциональности диаграммы растяжения стали, допускается при соблюдении условия (16) увеличение сжимающих напряжений по линейной зависимости:

$$\sigma_{sc} = \varepsilon_{sk} \cdot E_s \geq -\sigma_{scU}, \tag{17}$$

где  $\sigma_{scU}$  – критические напряжения при потере устойчивости арматурных стержней, вычисляемые по формуле (1).

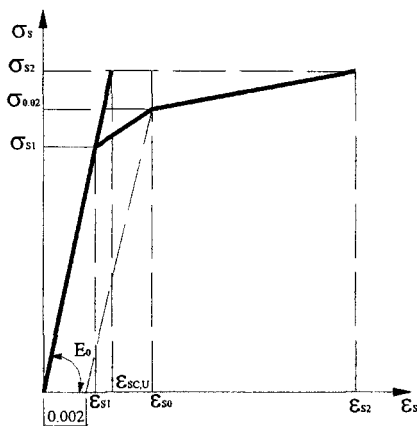


Рис. 6. Диаграмма деформирования арматуры

Используя вышеописанные расчетные условия и предпосылки, были выполнены расчеты несущей способности опытных образцов. За критерий исчерпания прочности в соответствии с моделью напряженно-деформированного состояния принято достижение деформациями сжатого бетона и арматуры в нормальном сечении элемента их предельных значений. Деформации железобетонных элементов определялись с использованием значений кривизны, укорочения и удлинения конструкций по средним деформациям бетона и арматуры.

В результате целого ряда численных экспериментов, в ходе которых рассматривались различные варианты трансформации диаграммы « $\sigma_c - \varepsilon_c$ », с учетом напряженно-деформированного состояния опытных образцов введены поправочные коэффициенты  $\gamma_f$  и  $\gamma_\varepsilon$  к значениям  $f_c$  и  $\varepsilon_{c1}$  соответственно или к координатам основной базовой точки диаграммы состояния бетона.

При этом отмечено, что без введения поправочных коэффициентов к описанию диаграммы деформирования бетона сжатой зоны расчетная несущая способность недооценивает до 40 % полученной в опытах для образцов с малой гибкостью, а для образцов с повышенной гибкостью это расхождение сокращается. Дальнейшей корректировкой поправочных коэффициентов, ориентируясь на результаты работы бетона сжатой зоны, получено максимальное сближение расчетных и опытных значений предельных усилий и деформаций при постоянном значении  $\gamma_f$ , равном 1, и переменной величине координаты базовой точки по оси « $\varepsilon$ » диаграммы:

$$\gamma_\varepsilon = 2,19 - 0,2 \cdot \mu - \lambda / 60, \quad (18)$$

где  $\lambda$  – гибкость конструкции, принимаемая в расчете  $\lambda \leq 15$ ;  $\mu$  – процент армирования сечения продольной высокопрочной арматурой (при  $\mu > 4,7\%$  в расчетах принимается  $\mu = 4,7\%$ ).

Область распространения предложений к уточнению деформационного метода ограничивается диапазоном варьирования основных факторов проведенных экспериментальных исследований. В связи с чем вводятся ограничения применимости рекомендуемых расчетных условий и предпосылок в следующих пределах:

- гибкость конструкций до 18;
- бетон тяжелый классов С16/20 - С25/30;
- проценты армирования сечений продольной высокопрочной арматурой сталью классов S800 - S1000 в пределах 3 - 7,5 % в сочетании с поперечной арматурой в виде хомутов, обеспечивающих устойчивость при работе на сжатие продольных стержней.

В результате проведения экспериментально-теоретических исследований предложена зависимость для расчета предельных напряжений в сжатой арматуре для различных классов стали, учитывающая возможности более полного использования высоких механических характеристик стержневой арматуры классов S800 и выше в сжатых железобетонных элементах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. - М., 1971.- 207 с.
2. Пикус Б.И. Механические свойства высокопрочных бетонов // Труды Иркутского политехнического института. - Иркутск, 1967. - Вып. 37. - С. 15 - 19.
3. Писанко Г.Н., Голиков А.Е. Прочность и деформативность высокопрочных бетонов на особо быстродействующем цементе // Бетон и железобетон. - 1966. - № 7. - С. 25 - 27.
4. Писанко Г.Н., Щербаков Е.Н. Предельная деформативность бетона при сжатии // Строительные конструкции. - Киев, 1970. - Вып. 15. - С. 105 - 109.
5. Босовец Ф.П., Лобанов А.Т. Исследование жестких железобетонных колонн из бетона марок 600 на центральное сжатие // Строительные конструкции. - Мн., 1976. - С. 45 - 48.
6. Беликов В.А. Исследование внецентренножатых железобетонных колонн из высокопрочных бетонов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. -М., 1969.-23 с.
7. Морин А.Л. Исследование несущей способности и деформативности внецентренно сжатых железобетонных элементов из высокопрочного бетона: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. - Киев, 1969.-27 с.
8. Рискинд Б.Я. Применение высокопрочной сжатой арматуры в железобетонных конструкциях // Промышленность сборного железобетона. Серия 3. - М., 1982. - Вып. 3. - 39 с.
9. Сурин В.В. Прочность внецентренно сжатых железобетонных элементов с высокопрочной стержневой арматурой (при кратковременной нагрузке): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Челябинск, 1981.-24 с.
10. Рискинд Б.Я., Шорникова Г.И. Работа стержневой арматуры на сжатие // Бетон и железобетон. - 1974.-№ 10.-С. 34-36.