

УДК 574.075

Ю.В.ГЛАЗУНОВ, канд. техн. наук

*Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, г.Харьков*

### **АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СТАЛЕБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОД НАГРУЗКОЙ**

Приводятся исследования и рассматриваются особенности работы конструкций, выполненных из сталебетона, при центральном сжатии. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований работы сталебетонных конструкций под нагрузкой. Предлагаются способы расчета сталебетонных колонн прямоугольного сечения.

Основные направления прогресса в строительстве тесно связаны с применением эффективных конструкций, к которым относятся конструкции с внешним армированием, в частности, колонны, составленные из прямоугольной обоймы, заполненной бетоном.

Экономичность конструкции с внешним армированием, по сравнению с традиционными железобетонными, обеспечивается за счет более рационального использования свойств материалов. Бетон, работающий в условиях объемного напряженного состояния, воспринимает напряжения, значительно превышающие прочность неизолированного бетона. Стальная обойма (оболочка), заполненная бетоном, в значительной степени защищена от потери местной и общей устойчивости.

Технико-экономические исследования [1, 2] показали, что применение сталебетонных элементов для колонн промышленных зданий позволяет экономить 35-45% стали по сравнению со стальными колоннами и до 14% – с железобетонными. Приведенные затраты снижаются в первом случае на 28-37%, во втором – на 51-62%. Использование сталебетонных колонн в подкрановых эстакадах позволяет экономить до 12-18% стали по сравнению со стальными и до 9% – с железобетонными. Приведенные затраты снижаются на 32-46%.

Несмотря на высокую экономичность, широкое применение сталебетонных колонн сдерживается из-за недостаточной разработанности способов расчета, отражающих особенности приложения внешней продольной нагрузки.

Создание конструктивных специальных схем, освоение новых технологических процессов изготовления труб и разработка узлов [1, 6], использование на заводах железобетонных конструкций вибрационных процессов для скоростного заполнения труб бетоном способствует развитию сталебетонных конструкций.

Применяемые в строительстве бетоны чрезвычайно разнообраз-

ны: они отличаются по структуре (плотные, крупнопористые, ячеистые), плотности (от 500 до 2500 кг/м<sup>3</sup>), виду и зерновому составу заполнителей, условиям твердения [1].

На физико-механические свойства бетона большое влияние оказывает его структура [3]. Она представлена в виде пространственной решетки из цементного камня, заполненной зернами песка и щебня различной крупности и формы, пронизанной большим количеством микропор и капилляров, которые содержат химически несвязанную воду, водяные пары и воздух.

При избытке химически несвязанной воды уменьшается плотность бетона, поры могут занимать около трети объема цементного камня, что снижает прочность бетона. Структура бетона неоднородна, сплошность массы нарушена. Цементный камень также неоднороден по структуре и состоит из упругого кристаллического сростка и наполняющей его вязкой массы.

Характерной особенностью бетона является то, что его структура с течением времени изменяется из-за смещения водного баланса, уменьшения объема твердеющего геля, роста упругих кристаллических сростков. Происходит уменьшение (усадка), которое зависит от количества и вида цемента, наличия воды, крупности и вида заполнителей.

Интенсивность нарастания деформации усадки определяется влажностью окружающей среды и характером действующих на бетон нагрузок. Усадка целиком и полностью связана с физико-химическими процессами твердения бетона, приводящими к уменьшению объема цементного геля. В результате препятствия заполнителей усадке, в цементном камне возникают начальные растягивающие напряжения, неравномерность которых вызывает появление усадочных трещин в бетоне.

При действии внешней нагрузки напряженное состояние в бетоне усложняется. Происходит концентрация напряжений на более жестких частицах, по плоскостям соединения которых возникают усилия, стремящиеся нарушить связь между ними. Таким образом, в бетоне при осевом сжатии возникают продольные сжимающие и поперечные растягивающие напряжения. Разрушение бетона происходит вследствие разрыва бетона в поперечном направлении.

О.Я.Берг [4] в результате исследования характера работы бетона под нагрузкой установил, что до стадии достижения сжимающих напряжений  $R_{bl,ser}$  (при которых образуются первые микротрещины, соответствующие границе сопротивления бетона отрыву) продольная деформация складывается из упругой и пластической составляющих, а

выше границы  $R_{bt,ser}$  преобладающее значение имеют пластические деформации, вызванные развитием микротрещин. К моменту достижения бетоном призмной прочности его сопротивление растяжению в поперечном направлении преодолевается.

На конечной стадии загрузки происходит разрыв бетона. При этом, прирост поперечных деформаций на каждой ступени нагрузки увеличивается и при  $R_{bt,ser}$  достигает половины прироста продольной деформации, т.е. коэффициент поперечной деформации  $\nu = 0,5$ . Как показали исследования [3], возможно дальнейшее увеличение коэффициента поперечной деформации до  $0,8 \dots 1,0$ .

Таким образом, согласно теории О.Я.Берга [4], при увеличении напряжений от  $R_{bt,ser}$  до  $R_b$  происходит раскрытие микротрещин в макротрещины, а затем – полное разрушение бетона с образованием продольных трещин.

При трехосном напряженном состоянии влияние восстанавливающих сил столь значительно, что теоретически разрушить материал невозможно. Тем не менее, нарушение целостности бетона происходит вследствие смещения, скольжения отдельных его частей относительно друг друга.

Уравнение прочности бетона при объемном напряженном состоянии [4] имеет вид:

$$\sigma / R_b = 1 + k\sigma_3 / R_{bt}, \quad (1)$$

где  $R_{bt}$  – сопротивление бетона отрыву. Коэффициент  $k$  зависит от прочности бетона, значение его колеблется в пределах  $0,3 \dots 0,26$ .

Исследования характера работы бетона под нагрузкой приведены в трудах И.Н.Ахвердова [3], Ю.В.Зайцева [5], Н.И.Карпенко [6].

И.Н.Ахвердов [3] предложил теоретическую модель, позволяющую дифференцированно учитывать длительное сопротивление бетона в зависимости от его физико-механических свойств. Процесс длительного разрушения представлен как развитие, вследствие ползучести, трещин вокруг идеализированных круглых пор, равномерно распределенных в однородной и изотропной массе. Получено математическое описание процесса развития трещин на уровне макроструктуры.

Показано, что вначале образуются наклонные трещины контактной зоны, затем они изменяют свое направление, развиваясь преимущественно вдоль усилий сжатия. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит постепенное объединение трещин, вплоть до образования магистральной трещины, приводящей к разрушению бетона.

Общие продольные или поперечные деформации при кратковременном сжатии рассматриваются как состоящие из двух частей: де-

формации, протекающие без нарушения сплошности материала, и нелинейные деформации, возникающие за счет раскрытия трещин.

В исследовании [3] разработан теоретический подход, позволяющий оценивать значения продольных и поперечных деформаций бетона. Коэффициент поперечных деформаций предлагается вычислять по формуле:

$$v = (v_1 q / E + \epsilon''_2) / (q / E + \epsilon''_1), \quad (2)$$

где  $v_1$  – коэффициент Пуассона;  $q$  – приведенная нагрузка;  $\epsilon''_1$  и  $\epsilon''_2$  – относительные продольные и поперечные деформации, протекающие при нарушении сплошности бетона.

Установлено, что при длительном действии нагрузки из-за ползучести бетона трещины растут и при неизменных внешних напряжениях. Предложенные формулы позволяют определять время до разрушения бетона (длительная прочность).

Разработано математическое описание развития трещин при двухосном сжатии при кратковременном и длительном действии нагрузки. Установлено, что в случае трехосного сжатия ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) коэффициент интенсивности бокового давления  $k$  изменяется в широких пределах. При малом боковом давлении, когда разрушение происходит в основном отрывом, значение коэффициента превышает принимаемое обычно ( $k=4$ ). При более высоком боковом давлении, когда разрушение приобретает преимущественно сдвиговый характер, значение коэффициента уменьшается, приближаясь к 4.

Меньшая прочность бетона на пористых заполнителях при трехосном сжатии объясняется многими факторами. Это и «лимитирующая» роль пористого заполнителя в случае, когда он реализует свою наибольшую прочность в бетоне, и большая однородность бетона, и меньшие его пластические деформации, и многофакторное влияние структуры бетона.

Воздействие на бетон от внешней нагрузки накапливается в виде энергии. При удалении нагрузки деформации исчезают почти мгновенно, так как являются упругими. Пластические деформации приводят к разрывам и образованию новых кристаллических связей. В этом случае сохраняется новая конфигурация связей, деформация бетона необратима.

Отсутствие закономерности в расположении частиц и пор в бетоне, крупности последних приводит к разбросу прочности, которая зависит от технологических факторов, возраста и условий твердения бетона [1].

Установлено, что прочность бетона нарастает с течением време-

ни. Она в значительной степени зависит от формы и размеров образца, вида напряженного состояния. В инженерных расчетах конструкций применяется призмная прочность  $R_b$ . Известно, что при растяжении она в 10...20, при срезе – в 5...10 раз меньше, чем при сжатии.

В настоящее время для изготовления строительных конструкций применяются бетоны классов по прочности на сжатие В3,5 ... В60 и на осевое растяжение – В<sub>т</sub>0,8 ... В<sub>т</sub>3,2. Прочность зависит и от длительности действия нагрузки. При этом, в бетоне развиваются значительные неупругие деформации, он разрушается при меньших напряжениях, чем временное сопротивление  $R_b$ . При многократных нагрузках вследствие развития структурных микротрещин прочность бетона также уменьшается. Установлено, что она зависит от  $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  и ее наименьшее значение может составлять 0,5  $R_b$ .

Развивающиеся в бетоне деформации подразделяются на объемные (вследствие усадки, воздействия температуры) и силовые (по направлению действующих сил). Силовым продольным деформациям соответствуют поперечные, увеличивающиеся с ростом продольных напряжений. Начальное значение коэффициента Пуассона для бетона  $\nu = 0,2$ . В связи с тем, что в бетоне наравне с упругими развиваются пластические деформации, силовые деформации подразделяются на три вида: при однократном нагружении кратковременной нагрузкой, при длительном, а также многократном повторном действии нагрузки.

Объемные деформации изменяются в достаточно широких пределах. Для тяжелых бетонов деформации усадки достигают  $30 \cdot 10^{-5}$  и более. При набухании деформации в 2-5 раз меньше, чем при усадке.

Считается, что при однократном нагружении полные деформации складываются из упругих и пластических. После снятия нагрузки большая часть (около 10%) неупругих деформаций восстанавливается (деформации упругого последствия).

При длительном действии нагрузки неупругие деформации с течением времени увеличиваются, при этом наибольшая интенсивность нарастания деформаций наблюдается первые 2-3 месяца после нагружения. Установлено, что деформации ползучести могут в 3-4 раза превышать упругие. Явление релаксации напряжений в бетоне имеет ту же природу, что и деформации ползучести.

На деформации ползучести бетона влияют многие факторы: значения напряжений, возраст бетона в момент нагружения, влажность окружающей среды, технологические факторы (водоцементное отношение (В/Ц), вид и прочность заполнителя).

Явление ползучести объясняется длительностью процессов крис-

таллизации и уменьшением количества геля при твердении бетона. В результате длительного действия нагрузки происходит перераспределение напряжений с вязкой (гелевой) составляющей на кристаллический сросток и зерна заполнителей, которые упруго деформируются в результате возрастания напряжений [7-10]. В зависимости от значения действующих на бетон напряжений ползучесть подразделяется на линейную и нелинейную. Считается, что нелинейная ползучесть наблюдается при напряжениях, превышающих  $R_{bt,ser}$ .

При многократном повторении циклов загрузки происходит накопление неупругих деформаций [11]. После определенного количества циклов неупругие деформации затухают, бетон начинает работать упруго. Эта закономерность соблюдается, если  $\sigma_b \leq R_b$ , в противном случае после некоторого количества циклов неупругие деформации начинают неограниченно расти, что приводит к разрушению образцов.

Важной характеристикой бетона являются его предельные деформации. В среднем принимают  $\epsilon_{b,n} = 200 \cdot 10^{-5}$  при сжатии,  $\epsilon_{b,n} = (270 \dots 450) \cdot 10^{-5}$  при изгибе. Предельная растяжимость в 10-20 раз меньше ( $\epsilon_{bt,u} = 15 \cdot 10^{-5}$ ).

Нормируемой характеристикой бетона, определяющей его деформативность при кратковременном действии нагрузки, является начальный модуль упругости, соответствующий упругим деформациям, возникающим при мгновенном нагружении:

$$E_b = \operatorname{tg} \alpha_0, \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  – угол наклона прямой упругих деформаций.

Для расчета железобетонных конструкций чаще всего используют модуль упругопластичности, представляющий собой тангенс угла наклона  $\alpha_1$  секущей к кривой  $\sigma_b - \epsilon_b$  в точке с заданным напряжением,

$$E'_b = \operatorname{tg} \alpha_1. \quad (4)$$

Здесь  $E'_b$  – переменная величина вследствие изменения угла  $\alpha_1$  с ростом напряжений.

При изгибе  $E'_b$  может быть на 15-20% больше, чем при осевом сжатии.

При растяжении:

$$E'_{bt} = \nu_{bt} E_b, \quad (5)$$

где  $\nu_{bt} = 0,5$ .

Деформативность бетона при длительном действии нагрузки характеризуется мерой ползучести:

$$C = \epsilon_{pl}(t) / \sigma_b, \quad (6)$$

где  $\epsilon_{pl}(t)$  – деформации ползучести;  $\sigma_b$  – напряжения в бетоне.

Если принять, что характеристика ползучести бетона

$$\varphi_t = \varepsilon_{pl}(t) / \varepsilon_{el}, \quad (7)$$

где  $\varepsilon_{el}$  – начальные деформации, то

$$C = \varphi_t / E_0. \quad (8)$$

Мера и характеристика ползучести бетона зависят от тех же факторов, что и сами деформации ползучести, и являются переменными во времени.

Для аналитического выражения ползучести бетона используют различные теории [7-10]. Разработаны также приемы, основанные на применении ЭВМ и дискретных модулей, когда на каждой ступени загрузки анализируется своя зависимость  $\sigma - \varepsilon$ , построенная по средним опытным диаграммам.

Таким образом, даже обычные тяжелые бетоны обладают физико-механическими свойствами, в заключительной мере зависящими от различных внешних факторов. Это разнообразие возрастает, если учесть, что наряду с обычными применяются шлакощелочные, ячеистые, крупнопористые, полимерцементные и другие виды бетонов. Для их приготовления используются самые разнообразные компоненты, в том числе отходы промышленности.

Важной составной частью железобетона является арматура, которую устанавливают, в основном, для восприятия растягивающих напряжений. В зависимости от технологии изготовления арматура подразделяется на горячекатаную стержневую и холоднотянутую проволочную. С целью упрочнения она может подвергаться термической обработке или вытяжке. Для улучшения сцепления с бетоном большая часть выпускаемой арматуры имеет периодический профиль. Применяется также жесткая арматура в виде прокатных профилей.

Характеристики прочности и деформаций арматуры устанавливают по диаграмме  $\sigma_s - \varepsilon_s$ , получаемой на основе испытания образцов на растяжение. Для арматурной стали без площадки текучести на диаграмме устанавливается условный предел текучести – напряжение, при котором остаточные деформации равны 0,2%.

Как и бетон, арматура обладает пластическими свойствами, которые характеризуются относительным удлинением при испытании на разрыв. К реологическим свойствам арматурной стали относятся ползучесть и релаксация.

В зависимости от класса арматуры ее прочность изменяется в значительных пределах – от 380 (для арматуры класса А-I) до 1900 МПа (В-II), при высокотемпературном нагреве – снижается. В отличие от прочности, модуль упругости стали колеблется в незначи-

тельных пределах:  $(2,0-2,1) \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu_s = 0,3$ .

Наряду со стальной, находит применение неметаллическая арматура, в частности стеклопластиковая.

Из приведенных сведений о физико-механических свойствах бетона и арматуры следует, что железобетон – сложный материал, обладающий изменчивыми, зависящими от многих факторов физико-механическими свойствами. Задача состоит в том, чтобы при расчете конструкций в полной мере учитывались эти свойства с целью проектирования надежных и экономически выгодных конструкций.

Оценка эффективности сталебетонных колонн проводилась в сопоставлении с эффективностью железобетонных конструкций. Согласно принципа сопоставимости, предусматривался расчет указанных конструкций на одинаковые нагрузки. Данные конструкции запроектированы в соответствии со строительными нормами и правилами, имеют одинаковые нормативные и расчетные характеристики бетона и стали, назначения и условия эксплуатации.

Исследование сочетания стальных конструкций с железобетонными преследовало цель достигнуть более высоких технико-экономических показателей при строительстве зданий и сооружений за счет использования преимуществ каждого из компонентов комбинированных конструкций при одновременном устранении их недостатков.

Армирование бетона внешней оболочкой означает его изоляцию от окружающей среды. Таким образом, создаются лучшие условия для работы бетона под нагрузкой. Тонкостенные колонны с металлической оболочкой, заполненной бетоном, отличаются от обычных колонн из армированного бетона более рациональным использованием материалов.

В сталебетонных колоннах наличие обоймы, сопротивляющейся перемещению бетона в поперечном направлении, приводит к увеличению прочности бетона, а наличие заполнителя внутри оболочки увеличивает ее устойчивость. Бетон и сталь в таком сочетании создают наиболее благоприятные условия для совместной работы. Для изучения отмеченных особенностей работы таких конструкций и проверки теоретических решений были проведены экспериментальные исследования.

Полученные результаты экспериментальных исследований сталебетонных колонн на центральное сжатие при различных способах передачи продольной нагрузки позволяют отметить следующее: при замене железобетонных конструкций сталебетонными значительно уменьшается расход бетона (12-15%), вдвое снижаются трудозатраты и стоимость конструкций, уменьшается их масса (9-11%). При замене

стальных конструкций сталебетонными происходит экономия стали, при этом общая масса конструкций практически не увеличивается.

Сталебетонные колонны предлагается применять в качестве стоек и каркасов многоэтажных жилых, общественных и промышленных зданий, при строительстве мостов, путепроводов и транспортных развязок. Во всех случаях по сравнению с железобетоном той же несущей способности снижается себестоимость строительства (15-20%) и уменьшается расход строительных материалов (30-40%).

1.Стороженко Л.И., Плахотный П.И., Черный А.Я. Расчет трубобетонных конструкций. – К.: Будівельник, 1991. – 120 с.

2.Чихладзе Э.Д., Арсланханов А.Д. Расчет сталебетонных элементов прямоугольного сечения на прочность при осевом сжатии // Бетон и железобетон. – 1997. – №1. – С.13-15.

3.Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.

4.Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона. – М.: Госстройиздат, 1961. – 96 с.

5. Зайцев Ю.В. Деформации и прочность цементного камня и бетона с учетом трещин в микро- и макроструктуре: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – М., 1975. – 48 с.

6.Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами и ее приложение к расчету балок, стенок, плит, элементов оболочек и стержней, подвергнутых изгибу с кручением: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. – М., 1976. – 46 с.

7.Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. – М.: Стройиздат, 1973. – 423 с.

8.Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. – М.: Гостехтеоретиздат, 1952. – 324 с.

9.Прокопович И.Е. Влияние длительных процессов на напряженно-деформированное состояние сооружений. – М.: Госстройиздат, 1963. – 260 с.

10.Улицкий И.И. Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов. – К.: Будівельник, 1967. – 346 с.

11.Барашников А.Я. Расчет железобетонных конструкций на действие длительных переменных нагрузок. – К.: Будівельник, 1977. – 156 с.

*Получено 24.10.2005*

УДК 624.131 : 624.15.04

Ю.Л.ВИННИКОВ, д-р техн. наук, О.В.АНДРІЄВСЬКА, канд. техн. наук

*Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка*

Б.І.ЗАВАЛІЙ, канд. техн. наук

*Полтавська регіональна комплексна лабораторія НДІБК*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ЗАНУРЕННЯ В ГРУНТ КОНІЧНОГО НАКОНЕЧНИКА**

Пропонується розрахункова схема вдавлювання в ґрунт конічного наконечника та її числова реалізація з використанням методу кінцевих елементів (МКЕ). Наведено результати порівняння числових і лабораторних досліджень.