

Ссылка для цитирования

Ситников С.Л. Марченко М.С. К вопросу об огнестойкости монолитных предварительно-напряженных железобетонных безбалочных перекрытий. // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №8. с.80-83.

К вопросу об огнестойкости монолитных предварительно-напряженных железобетонных безбалочных перекрытий

Сергей Львович Ситников, кандидат технических наук, директор

ООО «Следящие тест-системы», 117545, г.Москва, Дорожный 1-й проезд., д.9. e-mail: info@sts-hydro.ru

Максим Сергеевич Марченко, главный инженер проектов

ООО «ПроектСтройМост», 140414, г.Коломна, ул.Щуровская д.5, e-mail: info@psmost.ru

В данной статье рассмотрен зарубежный и отечественный подход к нормированию огнестойкости монолитных предварительно-напряженных железобетонных безбалочных перекрытий. Приведен пример определения огнестойкости таких конструкций.

Ключевые слова: огнестойкость, безбалочные перекрытия, предварительно-напряженный железобетон, без сцепления с бетоном.

About fire resistance of post-tensioned concrete slabs

Sergey L. Sitnikov, Maxim S. Marchenko

Foreign and national experience of fire resistance estimation for post-tensioned concrete slabs is considered. Example of fire resistance estimation for such structures are given.

Key words: fire resistance, flat slabs, post-tensioned concrete, unbonded.

В последнее десятилетие в России увеличивается количество объектов промышленно-гражданского назначения с применением предварительно-напряженных монолитных железобетонных перекрытий с натяжением арматуры на бетон после бетонирования — так называемая в иностранных источниках технология пост-напряжения (post-tensioning). Терминология на английском языке приводится, так как в европейских странах и США данная технология широко применяется уже начиная с 60-70х годов и накоплен соответствующий опыт и нормативная документация.

Несмотря на явное упоминание в современных отечественных нормах [1] и литературе [2] об эффективности применения систем перекрытий с натяжением канатов на бетон, внедрение «пост-напряжения» в нашей стране ограничивается различными организационными, психологическими, методологическими вопросами, которые возникают у потенциальных Заказчиков и проектных организаций, в том числе отсутствием или неполнотой необходимой информации по обеспечению огнестойкости таких конструкций. В качестве примера можно привести указание норм [3] об ограничении температуры напрягаемой арматуры не более 100°C. Далее будет показано, что при таких температурах влиянием огневого воздействия на огнестойкость канатов можно и вовсе пренебречь, так как, при обеспечении в канатах такой температуры, нет необходимости и в расчете перекрытий на огнесохранность, т.к. потеря предварительного напряжения в канатах не происходит [11].

Основным направлением применения «пост-напряженных» перекрытий являются общественные здания — многофункциональные торгово-развлекательные комплексы, паркинги и офисные здания. Первые и вторые характеризуются довольно большими площадями пожарных отсеков, последние в основном выполняются многоэтажными, что

приводит к повышению требований по огнестойкости к перекрытиям — границам отсеков — до значений огнестойкости по несущей способности REI150-REI180.

Рассмотрим опыт зарубежного нормирования огнестойкости «пост-напряженных» безбалочных сплошных перекрытий. Так согласно данным [4] американского института пост-напряжения (PTI) и в соответствии с нормами IBC 2003 [5] возможны три принципиальных подхода к данной проблеме: непосредственные испытания, табличный подход и расчет по аналитическим зависимостям. Натурные испытания регламентируются нормами [6], в которых установлены требования по размерам испытываемых конструкций, требования к продолжительности испытаний, схеме приложения температурной нагрузки и критерии признания соответствия конструкции требованиям по огнестойкости.

На основании натурных испытаний нормы [5] содержат данные по минимальным толщинам плит перекрытия и величинам защитного слоя для пост-напряженных перекрытий. Так, к примеру, для бетонов с силикатным заполнителем минимальная толщина плиты для огнестойкости R180 составляет 6.2 дюйма — 157мм. Минимальная величина защитного слоя канатов установлена для плит со свободно опертыми краями и защемленными, средние пролеты перекрытий приравниваются к защемленным элементам, крайние пролеты к свободно опертым. Так для средних пролетов перекрытий для обеспечения огнестойкости R180 необходим защитный слой по оси арматуры 1 дюйм — 25,4мм; для крайних пролетов 2 дюйма — 50,8мм. При этом, в зоне анкеровки канатов данные значения защитного слоя рекомендуется увеличить на 0,5 дюйма — на 12,7мм. Приводятся данные о влиянии высоких температур на напрягаемую арматуру. Согласно данным института пост-напряжения [4] при достижении температуры 800°F по Фаренгейту (около 450°C) прочность канатов уменьшается в два раза.

Расчет огнестойкости по аналитическим зависимостям в разделе 720 IBC 2003 [5] для большинства перекрытий дает значения выше, чем в таблицах при той же величине защитного слоя [4].

В европейских нормах EN 1992-1-2:2004 [7] подход к обеспечению огнестойкости «пост-напряженных» перекрытий аналогичен рассмотренному в американских нормах. Так для сплошных безбалочных предварительно-напряженных железобетонных перекрытий для обеспечения огнестойкости R180 установлена минимальная толщина плиты 200мм и защитный слой по оси канатов 45мм. Интересны графические зависимости температуры в толще бетона при различных длительностях воздействия, для толщины плиты 200мм при длительности 180 минут на глубине 50мм температура составляет около 480°C. Согласно данным таблицы 3.3 [7] коэффициент уменьшения прочности канатов на разрыв при температуре 400°C равен 0,5 — уменьшение прочности канатов в два раза. В той же таблице приведен коэффициент уменьшения прочности бетона при температуре 100°C — он равен 0,99, что означает потерю прочности на 1 процент.

Отечественная система регулирования огнестойкости перекрытий [8], [18] принципиально имеет подход аналогичный зарубежным: испытания конструкций [9], табличные данные [10,11], расчет по аналитическим зависимостям [11,12].

Совершенно не правильным будет полагать, что отечественные нормативы не имеют данных по обеспечению огнестойкости перекрытий с напрягаемой арматурой в виде канатов. К примеру, в Пособии [10] для перекрытий, защемленных по контуру, для обеспечения огнестойкости R180 (3 часа) установлено значение защитного слоя 40мм, что при учете для канатов коэффициента 0,8 (п.2.18 [10]) приводит к значению 50мм — аналогично нормам США [5] и близким к значениям в европейских нормах [7].

Указания по аналитическим расчетам, данные по температурам в плитах в зависимости от длительности огневого воздействия, критические температуры приведены в рекомендациях [11]. Так для толщины плиты 200мм температура прогрева на глубине 60мм от низа плиты составляет около 450°C — что близко к данным европейских норм [7]. Критической температурой для канатной арматуры предлагается считать 410°C [11].

Очень интересны результаты аналитических расчетов огнестойкости выполненные для

безбалочного перекрытия [12], при этом в качестве нагрузок рассматриваются только постоянные и длительные временные нагрузки, сочетание нагрузок является особым. Согласно этим данным, огнестойкость перекрытия толщиной 200мм с ненапрягаемым армированием в виде нижней сетки ф16А400 с шагом 200/200мм и защитным слоем 33мм до оси и в виде верхней сетки ф12А400 с шагом 200/200мм с защитным слоем до оси 28мм составила не менее R150, что гораздо выше табличных данных [10]. Учитывая выводы [5] и [7] об отсутствии принципиальных различий между огнестойкостью обычных перекрытий и предварительно-напряженных, можно предположить, что реальная огнестойкость перекрытий с напрягаемой арматурой будет выше, чем при использовании табличных данных американских, европейских и отечественных норм [10].

В процессе конструирования перекрытий с напрягаемой канатной арматурой инженер-конструктор в любом случае предусматривает установку нижней конструктивной арматурной сетки из ненапрягаемой стержневой арматуры, которая располагается с защитным слоем в свету от 20-30 мм. С учетом минимального диаметра такой арматуры 12мм (в двух направлениях 24мм) и половины расстояния до оси напрягаемой арматуры 8мм получаем минимальное значение защитного слоя до оси канатов 52 — 62 мм. Таким образом, даже без выполнения специальных мероприятий огнестойкость «пост-напряженных» перекрытий составляет не менее R120 – R150.

Выполним аналитический расчет огнестойкости по несущей способности для безбалочного перекрытия с сеткой колонн 9х9м толщиной 250мм из бетона В30. Ненапрягаемое армирование выполнено в виде верхних и нижних сеток ф12А500С с шагом 200/200мм. Таким образом, для сечений шириной 1м площадь ненапрягаемой арматуры составляет по 5,65 см² для верхней и нижней сетки. Защитный слой до центра тяжести обычной арматуры составляет 36мм (30мм в свету).

Напрягаемое армирование выполнено в виде пучков из 4-х канатов ф15,2мм типа К-7 каждый, выполненных в плоских каналаобразователях высотой 50мм, расположенных в надколонных полосах. Применяются высокопрочные канаты по EN 10138 ф15,2мм с напряжением разрыва 1860МПа и площадью 140мм² каждый. На ширине 9м находится три пучка по 4 каната — всего 12 канатов. Площадь напрягаемой арматуры для сечений шириной 1м составит: $A_p = 12 \cdot 140 / 9 = 1,87 \text{ см}^2$. После натяжения канатов выполняется инъецирование каналов цементным раствором — канаты получают сцепление с бетоном. Защитный слой до оси канатов 72мм.

Для расчета максимальной нагрузки воспринимаемой перекрытием при длительности пожара 180 минут воспользуемся рекомендациями [11]. Сначала определим температуру бетона и арматуры и получим значения нормативных сопротивлений бетона сжатию и арматуры растяжению.

Для сечений на опорах: температура растянутой обычной и канатной арматур менее 100°С; температура сжатого бетона 800°С. Нормативное сопротивление растяжению обычной нижней арматуры $R_{sn} = 500 \text{ МПа}$; нормативное сопротивление растяжению канатов $R_{pn} = 1640 \text{ МПа}$ – условный предел текучести при остаточном удлинении 0,2% [15]; нормативное сопротивление на сжатие бетона $R_{bnt} = R_{bnt} \cdot \gamma_{bt} = 22 \cdot 0,6 = 13,2 \text{ МПа}$.

Для сечений посередине пролета получаем температуру обычной нижней арматуры 580°С; температуру канатной арматуры 400°С; температура сжатого бетона менее 100°С. Нормативное сопротивление растяжению обычной нижней арматуры $R_{snt} = R_{sn} \cdot \gamma_{st} = 500 \cdot 0,39 = 195 \text{ МПа}$; нормативное сопротивление растяжению канатов $R_{pnt} = R_{pn} \cdot \gamma_{st} = 1640 \cdot 0,65 = 1066 \text{ МПа}$; нормативное сопротивление на сжатие бетона $R_{bn} = 22 \text{ МПа}$.

Так как применены канаты со сцеплением с бетоном мы воспользуемся методом предельного равновесия, что позволит нам не учитывать моменты в статически неопределимой конструкции от огневого воздействия и отпора канатов при натяжении [11].

Высота сжатой зоны в опорном сечении:

$$x_1 = (R_{sn} \cdot A_s + R_{pn} \cdot A_p) / (R_{bnt} \cdot b) = (500 \cdot 5,65 \cdot 10^{-4} + 1640 \cdot 1,87 \cdot 10^{-4}) / (13,2 \cdot 1) = 0,045 \text{ м.}$$

Высота сжатой зоны в пролетном сечении:

$$x_1' = (R_{snt} * A_s + R_{pnt} * A_p) / (R_{bn} * b) = (195 * 5,65 * 10^{-4} + 1066 * 1,87 * 10^{-4}) / (22 * 1) = 0,014 \text{ м.}$$

Проверку прочности ведем по формуле:

$$q * L_2 * (L_1 - 2c)^2 / 8 < 0,5 * (R_{sn} * A_s * z_{1s}' + R_{pn} * A_p * z_{1p}') * L_2 + (R_{snt} * A_s * z_{1s} + R_{pnt} * A_p * z_{1p}) * L_2 + 0,5 * (R_{sn} * A_s * z_{1s}' + R_{pn} * A_p * z_{1p}') * L_2,$$

где $q = (8,75 + 1,8) = 10,55 \text{ кН/м}^2$ – интенсивность нормативных постоянных и временной длительной нагрузки на перекрытия;

L_1 и L_2 – пролеты перекрытия в осях;

$c = 0,3$ – расстояние от центра колонн до пластических шарниров;

$z_{1s} = h_0 - 0,5 * x = 0,25 - 0,036 - 0,5 * 0,014 = 0,207 \text{ м}$ – плечо обычной арматуры в пролетном сечении;

$z_{1s}' = h_0 - 0,5 * x' = 0,25 - 0,036 - 0,5 * 0,045 = 0,191 \text{ м}$ – плечо обычной арматуры в опорном сечении;

$z_{1p} = h_0 - 0,5 * x = 0,25 - 0,072 - 0,5 * 0,014 = 0,171 \text{ м}$ – плечо канатной арматуры в пролетном сечении;

$z_{1p}' = h_0 - 0,5 * x' = 0,25 - 0,072 - 0,5 * 0,045 = 0,155 \text{ м}$ – плечо канатной арматуры в опорном сечении.

Левая часть формулы проверки: $10,55 * 9 * (9 - 2 * 0,3)^2 / 8 = 837 \text{ кНм}$

Правая часть формулы: $0,5 * (500 * 10^3 * 5,65 * 10^{-4} * 0,207 + 1640 * 10^3 * 1,87 * 10^{-4} * 0,171) * 9 + (195 * 10^3 * 5,65 * 10^{-4} * 0,207 + 1066 * 10^3 * 1,87 * 10^{-4} * 0,171) * 9 + 0,5 * (500 * 10^3 * 5,65 * 10^{-4} * 0,191 + 1640 * 10^3 * 1,87 * 10^{-4} * 0,155) * 9 = 499 + 512 + 456 = 1467 \text{ кНм}$

Как видно $837 \text{ кНм} < 1467 \text{ кНм}$, таким образом, огнестойкость перекрытия по несущей способности обеспечена.

В случае применения канатов без сцепления с бетоном (моностренды) необходимо учесть следующие особенности расчета огнестойкости: сопротивление канатов растяжению принимаются равным установившемуся напряжению в канатах после протекания всех потерь [16], что для многих случаев составит около 700-800 МПа, что на 30-40% меньше сопротивления канатов со сцеплением; необходимо использовать упругий статический расчет и учитывать дополнительные изгибающие моменты от разницы температуры по высоте сечения; при расчете на температурное воздействие необходимо использовать жесткости элементов с учетом трещинообразования; необходимо учитывать «вторичные» моменты от натяжения канатов (secondary moments [4]).

Также необходимо отметить, что в случае применения канатов без сцепления с бетоном, появляется возможность достаточно простым способом заменить или натянуть отдельные канаты, получившие повреждения в процессе пожара [4].

Выводы.

1. Для предварительной оценки огнестойкости «пост-напряженных» перекрытий по несущей способности R до выхода новых табличных данных предлагается пользоваться данными, приведенными в Пособии [10].

2. Для исключения перерасхода бетона при назначении величины защитного слоя необходимо применять аналитические методы расчета огнестойкости [11], рассматривая в качестве нагрузок нормативные значения постоянных и длительных временных нагрузок [12].

При этом, в случае применения методов предельного равновесия необходимо применять канаты со сцеплением с бетоном и обеспечивать конструктивные требования [14]: не менее 20% требуемой верхней арматуры над колоннами должно проходить в середине пролета; над средними колоннами вся верхняя арматура должна продолжаться за колонну не менее чем на 15% от длины пролета; над крайними колоннами верхняя арматура должна быть продолжена на величину 40% от длины пролета в сторону края здания; количество непрерывной и заводимой за колонну арматуры может быть обеспечено суммарной площадью канатной и ненапрягаемой стержневой арматуры.

При применении канатов без сцепления с бетоном усилия в элементах перекрытия необходимо определять с помощью статических расчетов в упругой постановке методом

конечных элементов или методом замещающих рам [13], при этом необходимо учитывать моменты в статически-неопределимой конструкции от разницы температуры по высоте сечения и от натяжения канатов.

3. Даже без выполнения специальных мероприятий из-за конструктивных особенностей расположения канатов в арматурном каркасе огнестойкость «пост-натяженных» перекрытий по несущей способности составляет не менее R150 – R180.

4. В случае применения канатов без сцепления с бетоном (типа «моностренды») необходимо обеспечить армирование из обычной стержневой арматуры в количестве не менее чем в разделе 18 [17].

Литература

1. СП 52-103-2007. Железобетонные монолитные конструкции зданий.
2. Армирование элементов монолитных железобетонных зданий. Пособие по проектированию. / НИИЖБ. М.:2007.
3. ТСН 31-332-2006. Жилые и общественные высотные здания. Санкт-Петербург.
4. Post-Tensioning Manual, Sixth edition, Post-Tensioning Institute. 2006.
5. IBC 2003. International Building Code, International Code Council, Inc.
6. ASTM E119. Standard Fire Test of Building Construction and Materials..
7. BS EN 1992-1-2:2004. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: General rules – Structural fire design.
8. 123-ФЗ. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.
9. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
10. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (К СНиП П-2-80). М.: Стройиздат, 1985.
11. СТО 36554501-006-2006. Правила по обеспечению огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций. / НИИЖБ.2006.
12. В.В. Жуков, И.С.Молчадский, В.Н.Лавров. Расчет пределов огнестойкости безбалочных перекрытий. // Пожарная безопасность. 2006. №1. с.36-41.
13. Рекомендации по проектированию железобетонных монолитных каркасов с плоскими перекрытиями. А.С. Залесов, Е.А.Чистяков. М.:1993.45с.
14. Руководство по расчету статически неопределимых железобетонных конструкций. / НИИЖБ. М:Стройиздат, 1975. 192 с.
15. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.
16. Мадатян С.А. Системы предварительного напряжения арматуры с натяжением ее на бетон без сцепления. // Технологии бетонов. 2007. №1. с.48-51.
17. ACI 318M-08. Building Code Requirements for Structural Concrete.
18. Кривцов Ю.В., Микеев А.К., Пронин Д.Г. Развитие требований пожарной безопасности к огнестойкости конструкций в строительных нормах и правилах, разрабатываемых ЦНИИСК. // Промышленное и гражданское строительство. 2009. №10. с.25-26.