

УДК [614.841.332+539.422.22]:693.56

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ПЛИТ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

Полева И.И., Зайнудинова Н.В.

Рассмотрена возможность возникновения хрупкого разрушения бетона сжатой зоны железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном. Определен предел огнестойкости по несущей способности данных конструкций, а также по результатам натурных испытаний и решения обратной задачи на определение огнестойкости определена критическая температура для арматуры и рассмотрены схемы разрушения плит.

Ключевые слова: огнестойкость, предел огнестойкости, стандартный температурный режим пожара, хрупкое разрушение, весовая влажность.

(Поступила в редакцию 25 мая 2016 г.)

Введение. Одним из перспективных направлений в области строительства является создание преднапряжения арматуры без сцепления с бетоном, для возведения железобетонных конструкций с небольшим сечением. С целью изучения поведения данных конструкций в условиях пожара проведены исследования по оценке огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном [1]. В качестве рассматриваемых строительных конструкций приняты железобетонные предварительно напряженные плиты без сцепления арматуры с бетоном. Марка бетона $C^{25}/_{30}$ (B30), длина 5980 мм, ширина 1490 мм, высота 220 мм. Расстояние до оси арматуры составляет 37,8 мм. При оценке огнестойкости рассматривались: возможность хрупкого разрушения сжатого слоя бетона, схема разрушения конструкций и параметры, при которых наступает предельное состояние по несущей способности.

Основная часть. Под воздействием сжимающих напряжений от внешней нагрузки, неравномерного нагрева по толщине сечения конструкции и растягивающих напряжений от фильтрации пара в структуре бетона образуются трещины, сопровождаемые отколами от нагреваемой поверхности кусков бетона [2,3] и ведущие к хрупкому разрушению защитного слоя конструкции. При оценке хрупкого разрушения конструкций рассмотрены три подхода: оценка весовой влажности, критерия хрупкого разрушения, величины напряжения сжатия в бетоне.

Согласно [2] в сжатых железобетонных конструкциях толщиной (шириной поперечного сечения) менее 200 мм из тяжелого бетона плотной структуры с силикатным заполнителем с весовой влажностью более 3,5 % следует ограничивать величину напряжения сжатия в бетоне σ_{cr} , МПа для исключения образования хрупкого разрушения бетона, поскольку по [4] взрывное (хрупкое) разрушение бетона маловероятно при влажности бетона менее рекомендованного значения процентов по массе равного 3 %. Если весовая влажность конструкции до допустимого интервала в 2-3,5% [2-4], то хрупкое разрушение будет отсутствовать. Результаты натурных испытаний [1] показывают, что для железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, влажность которых составила 0,9–1,1 % характерно сильное хрупкое разрушение защитного слоя конструкции (рисунок 1). Таким образом, влажность в экспериментальных конструкциях не играла ключевой роли.



Рисунок 1 – Хрупкое разрушение защитного слоя бетона экспериментальных образцов

Оценка возможности хрупкого разрушения железобетонных конструкций при пожаре с использованием критерия хрупкого разрушения F определена по [2, 3]. При одном и том же значении марки бетона по прочности (классе бетона по прочности на сжатие), количественный состав компонентов бетонной смеси может отличаться, при этом бетонные смеси будут соответствовать техническим условиям, указанным в [5], а значение критерия хрупкого разрушения F для одной и той же марки бетона будет существенно отличаться.

Для опытных конструкций критерий хрупкого разрушения F составил 5,1, т. е. попадает в интервал потенциально опасный. Согласно натурным испытаниям хрупкое разрушение конструкций со сцеплением арматуры с бетоном практически отсутствует, для конструкций без сцепления, наоборот, характерно сильное хрупкое разрушение, т. е. в формуле учитываются только характеристики бетона (бетонной смеси), и не учитывается исполнение конструкции, напряжение сжатия в бетоне σ_{cr} (рисунок 2). Поэтому состав бетонной смеси является не основным фактором, влияющим на наличие и степень хрупкого разрушения конструкции. Как видно из рисунка 2, при одинаковом составе бетонной смеси в конструкциях по разному распределены напряжения, что оказывает значительное влияние на уровень хрупкого разрушения.

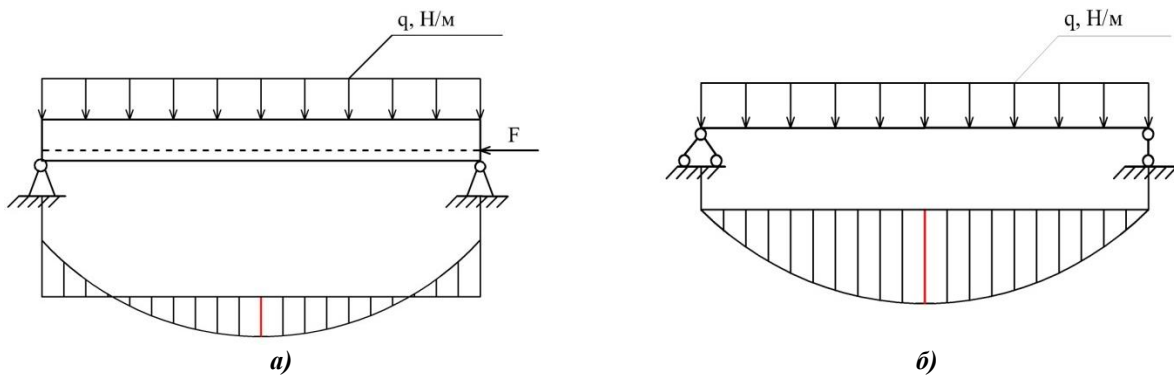


Рисунок 2 – Схема моментов предварительно напряженной плиты

а) статически неопределимого элемента, б) статически определимого элемента

Результаты натурных испытаний показывают необходимость учета не только характеристик бетона (бетонной смеси) и весовой влажности конструкции, но и вида напряжения конструкций, необходимость учитывать сжимающие напряжения, вызванные предварительно напряженной арматурой (со сцеплением с бетоном либо без сцепления). Для исключения хрупкого разрушения для железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в защитный (поверхностный) слой бетона со стороны нагрева необходимо предусматривать дополнительное конструктивное армирование, а именно установка сетки в защитном слое плиты на расстоянии от обогреваемой поверхности не более 0,5-1 см.

Проведенный анализ опытных данных [1] показал, что характер разрушения конструкции соответствует схеме разрушения железобетонной плиты, опертой по двум противоположным сторонам, при одностороннем нагреве, а именно разрушение в середине пролета плиты (рисунок 3, 4). Схема разрушения экспериментальных образцов соответствует стандартной схеме разрушения предварительно напряженных железобетонных плит со сцеплением арматуры с бетоном.

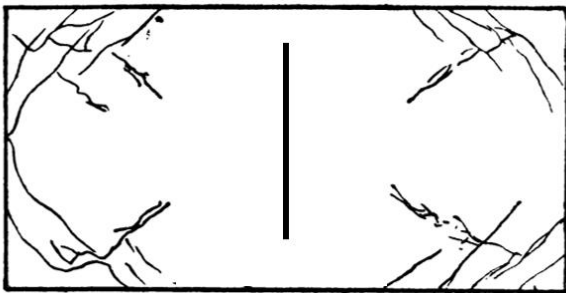


Рисунок 3 – Схема излома плиты, испытываемой под нагрузкой



Рисунок 4 – Фото разрушения железобетонных плит

Таким образом, расчет предела огнестойкости железобетонных плит, площадь сечения продольного рабочего армирования которых не изменяется вдоль пролета, следует выполнять сопротивление изгибающему моменту от внешней нагрузки только для среднего расчетного сечения.

При расчете температуры нагрева элементов расчетного сечения принят односторонний тепловой прогрев плит снизу. Передача тепла через боковые поверхности плит не учитывалась, так как стыки между плитами по длине, а также по торцам, заделывались минеральной ватой. Для определения предельных состояний **E, I** для железобетонных плит рассчитана приведенная толщина в соответствии с Приложением G [7], что составила 0,21 м и согласно таблице 5.3 [8] предел огнестойкости **EI 240**.

В соответствии с [4], к 30 минуте стандартного огневого воздействия (расчет) температура канатной арматуры составит 180 °С. Это соответствует коэффициенту снижения нормативного сопротивления напрягаемой арматуры [4] $k_p(\theta)$, равному 0,89. Следует отметить, что для предварительно напряженных конструкций критическая температура арматуры принимается: для стержней – 400 °С, для проволоки и **канатов** – 350 °С, а для предварительно напряженных элементов без связи арматуры с бетоном следует применять критические температуры выше 350 °С только при использовании более точных методов (а не упрощенные методы расчета) определения прогиба [4].

Таким образом, расчетное сопротивление арматуры к 30 минуте стандартного огневого воздействия (расчетный метод) составит:

$$f_{pd,fi}(\theta_m) = k_p(\theta) \cdot f_{pk} = 0,89 \cdot 1860 \cdot 10^6 = 1662 \cdot 10^6 \text{ Па}, \quad (1)$$

где $k_p(\theta)$ – коэффициент снижения сопротивления напрягаемой канатной арматуры;
 f_{pk} – предел прочности на растяжение напрягаемой канатной арматуры, Па.

К 30 минуте стандартного огневого воздействия температура верхней сжатой части бетона не превысит 50 °С. Прочность бетона при указанной температуре в соответствии с [4] не изменится. Прочность расчетного сечения (изгибающий момент внутренней пары сил) к моменту времени 30 минут стандартного огневого воздействия составит 128,4 кН·м, а внешний изгибающий момент в середине сечения 77,8 кН·м. Условие прочности в соответствии с [4] для 30 минут стандартного огневого воздействия:

$$R_{d,fi} = 128,4 \text{ кН} \cdot \text{м} > M_{ed,fi} = 77,8 \text{ кН} \cdot \text{м}. \quad (2)$$

Условие прочности выполняется, следовательно, прочность сечения к 30 минуте стандартного огневого воздействия для принятой расчетной нагрузки не исчерпана.

Расчет для остальных значений времени аналогичен и представлен в таблице 1. График снижения несущей способности плиты при стандартном огневом воздействии представлен на рисунке 5.

Таблица 1 – Результаты теплотехнического расчета для экспериментальной плиты

Время, мин	θ , °С	$k_p(\theta)$	$f_{pd,fi}$, кПа	λ_x , м	$M_{Rd,fi}$, кН·м
0	20	1,00	1860	0,022	142,9
30	180	0,89	1663	0,021	128,4
60	310	0,69	1291	0,019	100,3
90	400	0,46	856	0,014	67,42

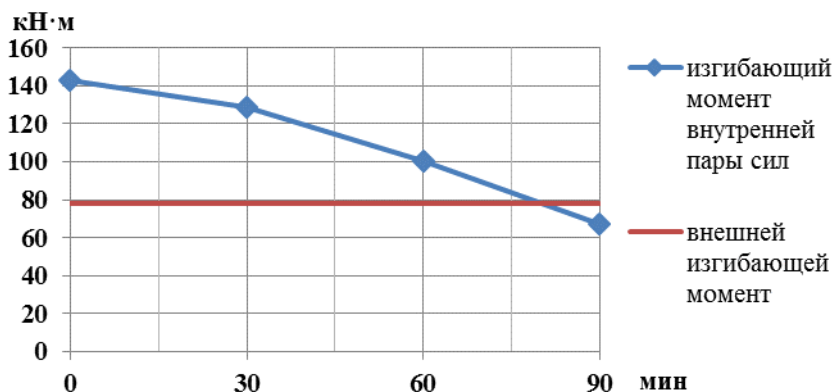


Рисунок 5 – График снижения несущей способности плиты при стандартном огневом воздействии

Исходя из расчета, предел огнестойкости по потере несущей способности составил 80 минут, а так как данное значение не входит в стандартный ряд, то время округляется до ближайшего меньшего значения из стандартного ряда и соответствует **R60**. При проведении натурных испытаний предел огнестойкости по потере несущей способности рассматриваемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном составил **R30** (фактическое время разрушения плит 33 минута). В ходе выполнения обратного расчета, исходя из предела огнестойкости по несущей способности R30, критическая температура для канатов составила **230°C** (средняя температура на канатах в момент, предшествующий разрушению конструкций составила 132 °C, 332 °C, 210 °C), что значительно ниже критической температуры согласно [4].

Заключение. В ходе определения предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит, имеющих опирание по двум сторонам получены следующие результаты:

– при оценке возможности хрупкого (взрывного) разрушения конструкции, кроме весовой влажности и критерия хрупкого разрушения, влияющих в меньшей степени на хрупкое разрушение в предварительно напряженных конструкциях, необходимо учитывать сжимающие напряжения в конструкции, вызванные обжатием бетона арматурой; при наличии напряжения сжатия в бетоне $\sigma_{сж}$ предусматривать дополнительное конструктивное армирование;

– схема разрушения экспериментальных образцов соответствует стандартной схеме разрушения предварительно напряженных железобетонных плит со сцеплением арматуры с бетоном, поэтому расчет предела огнестойкости конструкций, выполняется на сопротивление изгибающему моменту от внешней нагрузки только для среднего расчетного сечения, при этом критическая температура согласно [4] – 350°C, а фактическая критическая температура – 230°C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полевое, И.И. Результаты испытания на огнестойкость железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевое, Н.В. Зайнудинова, Н.И. Чайчиц // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 37–44.
2. ТКП 45-2.02-110-2008 Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
3. Рекомендации по защите бетонных и железобетонных конструкций от хрупкого разрушения при пожаре. – М.: Стройиздат, 1979. – 30 с.
4. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-2. Общие правила определения огнестойкости [Текст] = Еурокод 2. Праектаванне жалезабетонных канструкцый. Частка 1-2. Агульныя правілы вызначэння вогнеўстойлівасці: ТКП EN 1992-1-2-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 86 с. – (Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства).
5. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия = бетоны канструкцыйныя цяжкія. Тэхнічныя ўмовы. СТБ 1544-2005. – Введ. 01.07.05. – Минск: Госстандарт, 2005. – 20 с.
6. Михайлов, В.В. Предварительно-напряженные железобетонные конструкции: (Теория, расчет и подбор сечений). – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1978. – 383 с.
7. Изделия железобетонные сборные. Плиты многопустотные = Вырабы жалезабетонныя зборныя. Пліты шматпустотныя: СТБ EN 1168-2012. – Введ. 20.04.12. – Минск: Госстандарт, 2012. – 58 с.
8. Арматура напрягаемая канатная для железобетонных конструкций. Технические условия = Арматура напружваемая канатная для жалезабетонных канструкцый. Тэхнічныя ўмовы: СТБ EN 10138-3-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск: Госстандарт, 2010. – 13 с.
9. СНБ 5.03.01-02 Бетонные и железобетонные конструкции // Полнотекстовая информационно-поисковая система «СтройДОКУМЕНТ» [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. и прогр. (700 Мб). – Минск, НПП РУП «Стройтехнорм», 2007. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

10. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Введ. 01.10.98. – Минск: Минсктиппроект, 1998. – 12 с.
11. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции: ГОСТ 30247.1-94. – Введ. 01.10.98. – Минск: Минсктиппроект, 1998. – 7 с.

DETERMINATION OF THE FIRE RESISTANCE OF PRESTRESSED CONCRETE SLAB WITH UNBONDED REINFORCEMENT

Palevoda Ivan, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Zainudzinava Natallia

The state educational establishment «Institute for Command Engineers»
of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

Purpose. The article is dedicated to features of determination of the fire resistance of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement.

Methods. The fire test concrete slabs with unbonded reinforcement of the fire resistance.

Findings. The probability of occurrence of fragile destruction of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement of the compressed zone is considered. The fire resistance limit of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement and critical temperature for reinforcement are determined. Inverse problem on determination of fire resistance defined the critical temperature for reinforcement. The schemes of slabs destruction are reviewed.

Application field of research. The obtained experimental study data could be used in calculation and design of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement.

Conclusions. The scheme of destruction of test samples meet the standard scheme of destruction of prestressed concrete slabs with unbonded reinforcement, while the rate of destruction is much higher and the critical temperature of reinforcement is much lower. For prestressed concrete slab with unbonded reinforcement by fire effect is typical strong brittle fracture in the compressed construction zone. As the brittle fracture can't be avoided in view of the specific of structures, it is necessary to apply the constructive solutions for the protection of the protective concrete layer.

Keywords: fire resistance, fire resistance limits, temperature regime, brittle failure, humidity.

(The date of submitting: June 25, 2016)

REFERENCES

1. Polevoda I.I., Zainudinova N.V., Chaichic N.I. Rezul'taty ispytaniya na ognestojkost' zhelezobetonnyh predvaritel'no naprjazhennyh plit bez scepneniya armatury s betonom [The results of the fire test concrete slabs with unbonded reinforcement of the fire resistance]. Vestnik Komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus'. 2016. No. 1 (23). Pp. 37-44. (rus)
2. Technical Code of Good Practice 45-2.2.02-110-2008 Building constructions. Calculation procedures of fire resistance limits. The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytechnorm», 2007. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus)
3. Rekomendacii po zashhite betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij ot hrupkogo razrusheniya pri pozhare [Recommendations for the protection of concrete and reinforced concrete constructions against brittle failure in case of fire]. Moscow : Stroyizdat, 1979. 30 p.
4. Technical Code of Good Practice EN 1992-1-2-2009 Plain concrete structures. Affirmed 01.01.2010. Minsk : The Ministry of Architecture and Building, 2010. 86 p. (rus)
5. Standard of Republic of Belarus 1544-2005³ Constructional normal – weight concretes. Specifications. Affirmed 01.07.2005. Minsk : Gosstandart, 2005. 20 p. (rus)
6. Mihaylov V.V. Predvaritel'no-naprjazhennye zhelezobetonnye konstrukcii (teorija, raschet, podbor sechenij) [Prestressed concrete construction (theory, calculation, dimensioning)]. Moscow, 1978. 383 p. (rus)
7. Standard of Republic of Belarus 1168-2012 Precast concrete products. Hollow core slabs. Affirmed 20.04.2012. Minsk: Gosstandart, 2012. 58 p. (rus)
8. Standard of Republic of Belarus 10138-3-2009 Prestressed wire-rope reinforcement for reinforced concrete structures. Specifications. Affirmed 01.01.2010. Minsk: Gosstandart, 2012. 13 p. (rus)
9. Building norms of Republic of Belarus 5.03.01-02 Plain and reinforced concrete structures. Affirmed 01.07.2003. Minsk: The Ministry of Architecture and Building, 2003. 144 p. (rus)

10. Interstate Standard 30247.0-94. Elements of building constructions. Fire resistance tests methods. General requirements. Affirmed 01.10.1998. Minsk : Minsktiproekt, 1998. 12 p. (rus)
11. Interstate Standard 30247.1-94 Elements of building constructions. Fire resistance tests methods. Loadbearing and separating constructions Affirmed 01.10.1998. Minsk: Minsktiproekt, 1998. 7 p. (rus)