

УДК 614.841.332:693.56

ОГНЕСТОЙКОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ПЛИТ БЕЗ СЦЕПЛЕНИЯ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

Полева И.И., Зайнудинова Н.В.

Представлены результаты численного и экспериментального моделирования поведения железобетонной предварительно напряженной плиты без сцепления арматуры с бетоном под воздействием стандартного пожара. Определен предел огнестойкости по несущей способности. Рассмотрены причины разрушения защитного слоя бетона. Результаты численного моделирования сопоставлены с экспериментальными данными.

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

(Поступила в редакцию 27 апреля 2018 г.)

Проектными организациями разработано большое количество видов типовых сборных железобетонных конструкций для различных отраслей строительства: жилые и общественные здания, транспорт, промышленность, что позволило увеличить производство и применение сборного железобетона, в том числе и предварительно напряженного. К предварительно напряженным относятся конструкции, в которых натяжение арматуры выполняют непосредственно на затвердевший бетон заданной прочности, а усилие предварительного обжатия передается на конструкцию при помощи механического закрепления арматуры с возможным последующим инъецированием каналов раствором или другими материалами [1–3]. Данное конструктивное исполнение позволяет снизить трещинообразование в растянутой зоне бетона и, как следствие, обеспечить целостность его защитного слоя и исключить коррозию арматуры. Одним из видов данных конструкций являются железобетонные предварительно напряженные плиты без сцепления арматуры с бетоном (рабочая арматура располагается в бетонном сечении в каналах или оболочках. Наличие такой оболочки говорит о том, что арматура, в отличие от стержневой, размещенной в типовых конструкциях, не имеет жесткого сцепления с бетоном).

К преимуществам применения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном относятся: снижение общего веса здания до 40 %, повышенная жесткость, уменьшение величины прогиба, снижение стоимости при строительстве до 30 % и эксплуатации, увеличение этажности здания без повышения нагрузки на фундамент; увеличение пролетов до 18 м, что позволяет применить больший спектр архитектурно-планировочных решений, снижение материалоемкости, трудоемкости и энергоемкости при строительстве [2–5]. К недостаткам – общий характер методик расчета пределов огнестойкости, позволяющий аналитическим методом определить огнестойкость железобетонных строительных конструкций для наиболее распространенных из них, без учета конструктивных особенностей железобетонных элементов [6–9], отсутствие экспериментальных данных по поведению железобетонных предварительно напряженных конструкций без сцепления арматуры с бетоном при температурном воздействии.

За основу для исследования огнестойкости строительных конструкций приняты предварительно напряженные железобетонные плиты перекрытия без сцепления арматуры с бетоном, в которых в качестве арматуры применен семипроволочный спиральный канат класса К-7 (S1400) диаметром 15,7 мм. Арматурный канат заключен в пластиковую оболочку, отделенную от стали прослойкой смазочного антикоррозийного состава. Расстояние между поверхностью пластиковой оболочки канатов и ближайшей поверхностью бетона выдержано в пределах 30 ± 5 мм. На заводе пустотных изделий ОАО «Минскжелезобетон» изготовлены экспериментальные образцы [10–11]. Проведено огневое испытание по методикам определения пределов огнестойкости, изложенным в [12–13], в испытательной печи для горизонтальных строительных конструкций, используемой Научно-исследовательским институтом пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций для сертификационных испытаний на огнестойкость. В печи создан стандартный температурный режим с точностью до 15 % в период до 10 минут и с точностью 10 % с 10-й минуты и до завершения испытания, т. е. находившийся в пределах допустимых отклонений, что указывает на однородность огневой среды, воздействующей на конструкции, а также на соответствие требованиям [12–13]. На 33-й минуте огневое воздействие прекращено в связи с наступлением предела огнестойкости по потере несущей способности. Для изгибаемых предварительно напряженных

железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном экспериментально определен предел огнестойкости по потере несущей способности, который составил R 30. Признаков по потере теплоизолирующей способности и целостности до момента разрушения конструкций не наблюдалось. Полученные результаты испытаний сопоставимы с результатами других авторов, проводивших испытания с соблюдением стандартного температурного режима, и позволяют оценивать огнестойкость экспериментальных образцов в соответствии с требованиями ТНПА Республики Беларусь и европейских стандартов.

В ходе проведения испытаний установлено, что для предварительно напряженных железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном, влажность которых составляла 0,9–1,1 %, при огневом воздействии характерно сильное хрупкое разрушение в сжатой зоне конструкции. Под воздействием высоких температур оно проявлялось со взрывным эффектом. Основные причины данного разрушения – структура и состав бетона, содержание влаги, напряженно-деформированное состояние, вызванное давлением пара в замкнутых порах материала, а также скорость нагрева. При оценке хрупкого разрушения конструкций рассмотрены три подхода: оценка весовой влажности, критерия хрупкого разрушения, величины напряжения сжатия в бетоне. В настоящее время для оценки хрупкого разрушения применяют критерий F , предложенный В.В. Жуковым. Данный критерий позволяет учитывать статическую теорию размеров трещин, а также объяснить зависимость процессов разрушения бетона при огневом воздействии. Для экспериментальных конструкций критерий хрупкого разрушения составил 5,1. Согласно ГОСТ 30247.0-94 [14] при $F < 4$ хрупкое разрушение в бетоне не наблюдается, при $4 < F < 6$ возникает его потенциальная опасность, а при $F > 6$ оно происходит. Согласно натурным испытаниям хрупкое разрушение конструкций со сцеплением арматуры с бетоном практически отсутствует, для конструкций без сцепления, наоборот, такое разрушение характерно [10–11, 14]. Следовательно, при оценке хрупкого разрушения в исследуемых конструкциях необходимо учитывать сжимающие напряжения, вызванные обжатием бетона арматурой, и предусматривать дополнительное конструктивное армирование при наличии напряжения сжатия в бетоне. Потеря целостности при хрупком разрушении бетона резко снижает предел огнестойкости железобетонной конструкции, поэтому целесообразно применять бетоны с ограничением расхода цемента, низким В/Ц и с более низким коэффициентом температурного расширения заполнителя.

При проверке на возможность хрупкого (взрывного) разрушения конструкции, кроме весовой влажности и критерия хрупкого разрушения, необходимо учитывать сжимающие напряжения. В защитном слое данных конструкций следует предусматривать дополнительное конструктивное армирование из ненапрягаемой стержневой арматуры.

В ходе натурных огневых испытаний получены необходимые для моделирования поведения конструкций зависимости между временем огневого воздействия и температурой на обогреваемой и необогреваемых поверхностях конструкций, температурой арматуры, прогибом. В платформе ANSYS Workbench создана расчетная программа, которая позволяет моделировать поведение элементов железобетонных предварительно напряженных плит, находящихся под огневым воздействием. Выполнены теплотехнический и прочностной (статический) расчеты. Решение задачи нестационарной теплопроводности сведено к определению температуры бетона и арматуры в любой точке поперечного сечения элемента в заданный момент времени. Полученные в теплотехническом расчете температурные поля импортируются в прочностной модуль, и производится расчет напряженно-деформированного состояния за весь временной интервал нагрева элементов железобетонных конструкций [15].

При моделировании нагрев плит осуществлялся равномерно по всей длине со стороны нижней поверхности (стороны армирования), как показано на рисунке 1. Температура этой поверхности соответствует температуре стандартного огневого воздействия.

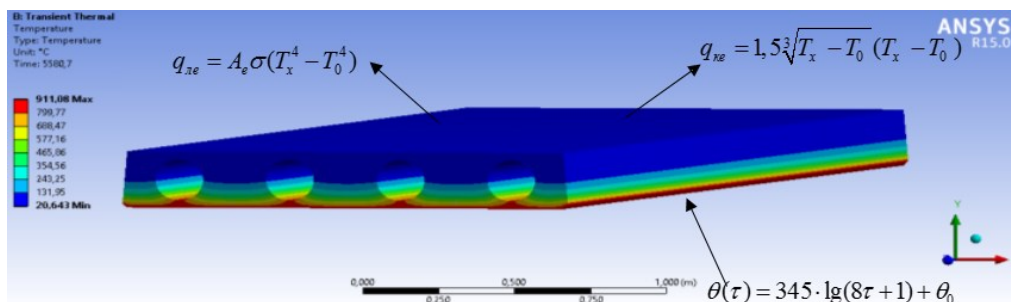
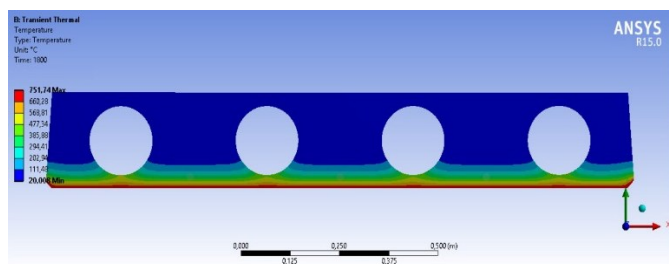


Рисунок 1. – Схема нагрева железобетонной плиты

Результат прогрева плиты на 30-й минуте и фото разрушения исследуемой конструкции на момент разрушения конструкции представлены на рисунке 2.



а) прогрев плиты на 30-й минуте



б) разрушение защитного слоя экспериментальных образцов

Рисунок 2. – Прогрев и разрушение экспериментальных образцов

Схема разрушения экспериментальных образцов соответствовала стандартной схеме разрушения предварительно напряженных плит со сцеплением арматуры с бетоном, с опорой по двум противоположным сторонам, при одностороннем прогреве. Поэтому расчет предела огнестойкости конструкций на сопротивление изгибающему моменту, возникающему под действием внешних сил, выполнен для среднего сечения конструкции. При моделировании получен прогиб плиты, соответствующий результатам натуральных испытаний. При теплотехническом расчете получены сопоставимые с результатами натуральных испытаний температурные поля. При этом температура в арматуре, как и при натуральных испытаниях, достигла значения 230 °С, при котором явление текучести в стали отсутствует.

Реализованная математическая модель позволяет учесть запредельное поведение бетона (при напряжениях и деформациях выше критических) с учетом его пластичности и возможных сдвиговых деформаций, что наиболее полно описывает поведение материала при нагружении изгибом с учетом арматуры. В результате численного моделирования разработаны параметрические модели железобетонных плит, построены нелинейные модели материалов бетона и арматурной стали, включающие упруго-пластические, температурозависимые диаграммы деформирования, а также трещинообразование в бетоне.

Хорошее согласование результатов моделирования с экспериментальными данными позволяет применять данную модель для оценки огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном.

В ходе проведения исследований получены следующие результаты:

1. Оценка огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном вследствие их сложности и новизны не может быть выполнена теоретическим методом по существующим методикам. Требуется выполнение натуральных испытаний для получения данных по температурному режиму арматуры, распределению температуры в сечении, схеме разрушения. Существующие методики оценки огнестойкости не в полном объеме учитывают конструктивное исполнение железобетонных предварительно напряженных плит, что не позволяет оценить огнестойкость данных конструкций. Отсутствие исследований в этой области может привести к переоценке предела огнестойкости данных конструкций и, как следствие, к преждевременному их разрушению при пожаре.

2. Получены экспериментальные данные в ходе проведения огневых испытаний по определению предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в испытательной печи для горизонтальных строительных конструкций. В результате испытаний определено, что для предварительно напряженных железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном при огневом воздействии характерно сильное хрупкое (взрывное) разрушение в сжатой зоне конструкции, вызванное обжатием бетона арматурой.

Потеря несущей способности железобетонных конструкций происходит в виду больших сжимающих напряжений в сжатой зоне бетона и арматуре. Установлено, что для исключения хрупкого разрушения и повышения предела огнестойкости необходимо предусматривать дополнительное конструктивное армирование. Предел огнестойкости изгибаемых железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном по потере целостности, несущей и теплоизолирующей способности составил REI 30.

3. Экспериментально получены зависимости между временем огневого воздействия и температурой на обогреваемой и необогреваемых поверхностях конструкций, температурой арматуры, прогибом. Для изгибаемых предварительно напряженных железобетонных плит без сцепления арматуры с бетоном критическая температура арматуры составляет 230 °С.

4. В программном комплексе ANSYS Workbench создана математическая модель, позволяющая принять во внимание в расчетах напряжения и деформации бетона выше критических с учетом пластичности и возможных сдвиговых деформаций, что наиболее полно описывает поведение материала при нагружении изгибом с учетом арматуры. Результаты теоретических исследований могут быть использованы при проведении расчетов огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном, т. к. полученные данные соответствуют экспериментальным.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02 // 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).
2. Клевцов, В.А. Новая конструкция предварительно напряженного перекрытия с натяжением арматуры в построечных условиях / В.А. Клевцов, А.Н. Болгов, В.Я. Сухман // Бетон и железобетон. – 2010. – № 3. – С. 7–8.
3. Кишиневская, Е.В. Усиление строительных конструкций с использованием постнапряженного железобетона / Е.В. Кишиневская, Н.И. Ватин, В.Д. Кузнецов // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 3. – С. 29–32.
4. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования: учеб. пособие для студентов строительных специальностей / под ред. проф. Т.М. Пецоляда и проф. В.В. Тура. – Брест: БГТУ, 2003. – 380 с.
5. Асатрян, Л.В. Эффективность строительства с применением технологии преднапряжения железобетона / Л.В. Асатрян // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – № 2. – С. 55–57.
6. Строительные конструкции. Порядок расчета пределов огнестойкости: ТКП 45-2.02-110-2008 // 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).
7. Проектирование железобетонных конструкций: Еврокод 2. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий [Текст] = Праектаванне жалезабетонных канструкцый: Еўракод 2. Ч. 1-1. Агульныя правілы і правілы для будынкаў: ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск: М-во архітэктуры і стр-ва Респ. Беларусь, 2015. – 206 с. – (Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства).
8. Проектирование железобетонных конструкций: Еврокод 2. Ч. 1-2. Общие правила определения огнестойкости [Текст] = Праектаванне жалезабетонных канструкцый: Еўракод 2. Ч. 1-2. Агульныя правілы вызначэння вогнеўстойлівасці: ТКП EN 1992-1-2-2009. – Введ. 01.01.10. – Минск: М-во архітэктуры і стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 86 с. – (Национальный комплекс технических нормативных правовых актов в области архитектуры и строительства).
9. Ройтман, В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий / В.М. Ройтман. – М.: Пожарная безопасность и наука, 2001. – 382 с.
10. Милованов, А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре / А.Ф. Милованов. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.
11. Полевода, И.И. Результаты испытания на огнестойкость железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова, Н.И. Чайчиц // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 1 (23). – С. 37–44.
12. Полевода, И.И. Определение предела огнестойкости железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном / И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова // Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2016. – № 2 (24). – С. 32–37.
13. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции: ГОСТ 30247.1-94. – Введ. 01.10.98. – Минск: Минсктиппроект, 1998. – 7 с.
14. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Введ. 01.10.98. – Минск: Минсктиппроект, 1998. – 12 с.

15. Полевода, И.И. Моделирование поведения железобетонных предварительно напряженных плит без сцепления арматуры с бетоном в программном комплексе ANSYS И.И. Полевода, Н.В. Зайнудинова // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2017. – Т. 1. – № 4. – С. 385–391.

FIRE RESISTANCE OF BINDING PRESTRESSED CONCRETE SLAB WITH UNBONDED REINFORCEMENT

Ivan Palevoda, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Natallia Zainudzinava

The state educational establishment «University of Civil Protection 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 of concrete slabs with unbonded reinforcement on the fire resistance. Computer modelling of concrete slabs with unbonded reinforcement on the fire resistance.

Findings. The fire resistance limit of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement and critical temperature for reinforcement have been determined. The calculation of fire resistance of concrete slab with unbonded reinforcement is fulfilled in ANSYS.

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

Conclusions. In the article we constructed the model of reinforced concrete slabs with unbonded reinforcement. The behavior of the model under standard fire exposure is studied. The fire resistance limit of prestressed concrete slab with unbonded reinforcement and critical temperature for reinforcement are determined. Inverse calculation of determination of fire resistance defined the critical temperature for reinforcement. The fire resistance of the model is estimated. The simulation results are compared with the experimental data.

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

(The date of submitting April 27, 2018)

REFERENCES

1. *Concrete and reinforced concrete structures: Building design standards 5.03.01-02.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytekhnorm», 2007. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus)
2. Klevtsov V.A., Bolgov A.N., Sukhman V. Ya. Novaya konstruktsiya predvaritel'no napryazhennogo perekrytiya s natyazheniem armatury v postroechnykh usloviyakh [New design of prestressed ceiling with reinforcement tension under construction conditions]. *Beton i zhelezobeton.* 2010. No. 3 (23). Pp. 7–8. (rus)
3. Kishinevskaya E.V., Vatin N.I., Kuznetsov V.D. Usilenie stroitel'nykh konstruktsiy s ispol'zovaniem postnapryazhennogo zhelezobetona [Strengthening of building structures using post-stressed reinforced concrete]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal.* 2009. No. 3. Pp. 29–32. (rus)
4. *Zhelezobetonnye konstruktsii. Osnovy teorii, rascheta i konstruirovaniya [Reinforced concrete structures. Fundamentals of theory, calculation and design]:* textbook for students of construction specialties. Ed. by T.M. Petsol'd, V.V. Tur. Brest, BGTU. 2003. 380 p. (rus).
5. Asatryan L.V. Effektivnost' stroitel'stva s primeneniem tekhnologii prednapryazheniya zhelezobetona [Efficiency of construction using pre-tension reinforced concrete]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka.* 2008. No. 2. Pp. 55–57. (rus).
6. *Building. Procedure for calculating fire resistance limits: Technical Code of Good Practice 45-2.02-110-2008.* The full-text information retrieval system «StroyDOKUMENT». Electronic text data and programs (700 Mb). Minsk, RUE «Stroytekhnorm», 2007. 1 electronic optical disc (CD-ROM). (rus)
7. *Design of reinforced concrete structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings: Technical Code of Good Practice EN 1992-1-1-2009.* Affirmed 01.01.2010. Minsk: The Ministry of Architecture and Building, 2015. – 206 p. (rus).
8. *Design of reinforced concrete structures. Part 1-2. General rules for determining fire resistance: Technical Code of Good Practice EN 1992-1-1-2009.* Affirmed 01.01.2010. Minsk: The Ministry of Architecture and Building, 2015. 206 p. (rus).
9. Roytman V.M. *Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoykosti proektiruemykh i rekonstruiруemykh zdaniy.* Moscow: Pozharnaya bezopasnost' i nauka, 2001. 382 p. (rus)
10. Milovanov A.F. *Stoykost' zhelezobetonnykh konstruktsiy pri pozhare [Resistance of reinforced concrete structures in case of fire].* Moscow: Stroyizdat, 1998. 304 p. (rus)

11. Polevoda I.I., Zaynudinova N.V., Chaychits N.I. The results of the fire test concrete slabs with unbonded reinforcement of the fire resistance. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2016. No. 1 (23). Pp. 37–44. (rus)
12. Polevoda I.I., Zaynudinova N.V. Determination of the fire resistance limit of reinforced concrete prestressed slabs without adhesion of reinforcement to concrete. *Vestnik Komandno-inzhenerenogo instituta MChS Respubliki Belarus'*. 2016. No. 2 (24). Pp. 32–37. (rus).
13. *Construction constructions. Test methods for fire resistance. Supporting and protecting structures: Interstate Standard 30247.1-94*. Affirmed 01.10.1998. Minsk: Minsktiproekt, 1998. 7 p. (rus).
14. *Elements of building constructions. Fire resistance tests methods. General requirements: Interstate Standard 30247.0-94*. Affirmed 01.10.1998. Minsk: Minsktiproekt, 1998. 12 p. (rus).
15. Polevoda I.I., Zaynudinova N.V. Modeling behavior of concrete slabs with unbonded reinforcement in the ANSYS. *Vestnik Universiteta grazhdanskoy zashchity MChS Belarusi*. 2017. Vol. 1. No. 4. Pp. 385–391. (rus).