

ОЦЕНКА НА ПОЖАРНАТА ОПАСНОСТ ПРИ РАЗВИТИЕ НА ВЗРИВНО ОБРУШВАНЕ В СТОМАНОБЕТОННИ КОНСТРУКЦИИ

доц. д-р инж. Али Чакър

Варненски свободен университет „Черноризец Храбър“ – Варна

Резюме: Настоящото изследване разглежда пожарната опасност, свързана с развитието на взривно обрушване в стоманобетонни конструкции при пожарно въздействие. Специално внимание е отделено на механизмите на отделяне на бетонния слой, предизвикани от термични напрежения и вътрешно парно налягане. Анализирани са влиянието на взривно обрушване върху намаляването на ефективното напречно сечение, оголването на арматурата и понижаването на носимоспособността на конструктивните елементи. Установено е, че несиметричната загуба на бетон води до възникване на ексцентричност на натоварването и допълнителни огъващи моменти, които ускоряват процеса на разрушаване. Разгледано е отражението на това явление върху общата пожарна устойчивост и конструктивната надеждност на сградите. Особен акцент е поставен върху превантивните мерки за защита, насочени към ограничаване на риска от взривно обрушване и повишаване на пожарната безопасност.

Ключови думи: пожарна опасност, взривно обрушване, стоманобетонни конструкции, пожарна устойчивост, носимоспособност, конструктивна безопасност

Assessment of fire hazard under explosive spalling development in reinforced concrete structures

Assoc. Prof. Ali Chakar, PhD, Eng.

Varna Free University "Chernorizets Hrabar" - Varna

Abstract: The present study examines the fire hazard associated with the development of explosive spalling in reinforced concrete structures under fire exposure. Special attention is given to the mechanisms of concrete layer separation caused by thermal stresses and internal vapor pressure. The influence of explosive spalling on the reduction of the effective cross-section, exposure of reinforcement, and decrease in load-bearing capacity is analyzed. It is shown that the asymmetric loss of concrete cover may lead to eccentricity of the applied load

and the occurrence of additional bending moments, which accelerate structural failure. The study also discusses the impact of this phenomenon on the overall fire resistance and structural reliability of buildings. Particular emphasis is placed on preventive protection measures aimed at reducing the risk of explosive spalling and improving structural fire safety.

Keywords: fire hazard, explosive spalling, reinforced concrete structures, fire resistance, load-bearing capacity, structural safety

1. Увод

Пожарната безопасност представлява съществен елемент от общата система за техническа и експлоатационна безопасност в промишлените и строителните обекти. В условията на аварийни въздействия, свързани с високи температури, възникват сложни физико-механични процеси, които могат да доведат до значително влошаване на носимоспособността на конструктивните елементи и до развитие на прогресивни разрушения.

Стоманобетонът е един от най-широко използваните строителни материали поради своите високи якостни характеристики, добра устойчивост и сравнително висока пожароустойчивост. Въпреки това, при интензивно термично въздействие, особено при бързо нарастване на температурата, в бетона настъпват структурни изменения, свързани с деградация на механичните характеристики, развитие на вътрешни напрежения и загуба на защитния слой около армировката.

Особено опасно явление в този процес е така нареченият *взривно обрушване* – внезапно и често взривообразно отделяне на повърхностни слоеве бетон вследствие на комбинираното действие на температурни градиенти, вътрешно парно налягане и намалена якост на опън. Това явление значително ускорява топлинното проникване към армировката, което води до по-бърза загуба на носимоспособност, намаляване на пожароустойчивостта и повишаване на риска от локален или прогресивен конструктивен отказ.

Основната цел на настоящата работа е да се анализира механизмът на възникване на взривно обрушване, да се оцени неговото влияние върху напрегнато-деформираното състояние на стоманобетонните елементи и да се изследва степента на намаляване на

тяхната носимоспособност при пожарно въздействие. Особено внимание е отделено на инженерната оценка на риска и на възможностите за ограничаване на аварийните последици чрез конструктивни и организационни мерки.

2. Литературен обзор

Пожарната устойчивост на сградите е сред основните фактори, определящи тяхната експлоатационна надеждност и безопасност при аварийни въздействия. При възникване на пожар носещите конструкции са подложени на интензивни термични въздействия, които водят до изменение на механичните характеристики на строителните материали, развитие на вътрешни напрежения и значителни деформации. Анализът на безопасните условия на експлоатация при високи температури и екстремни натоварвания е разглеждан в редица изследвания, насочени към оценка на риска и ограничаване на аварийните последици [9], [10], [11], [12], [13], [14]. В допълнение, изследването на напрегнатото-деформирано състояние и носещата способност на стоманобетонни греди (на огъване и срязване) при различни методи на усилване или специфични геометрични ограничения в натисковата зона е обект на детайлни анализи съгласно, [17], [18], [20]. Важно значение за точното моделиране на работата на елементите има и дефинирането на еквивалентни работни диаграми за ограничен бетон [19], което пряко рефлектира върху оценката на остатъчната коравина на елементите при аварийни въздействия.

Особено значение за пожарната устойчивост на сградите има поведението на конструктивната система и взаимодействието ѝ с фундирането при въздействия, водещи до промяна в напрегнато-деформационното състояние. Изследванията, свързани с влиянието на подземните води върху якостно-деформационните характеристики на почвите и динамиката на свлачищните процеси, показват колко чувствителни са носещите системи и фундаменти към външни въздействия и изменения в граничните условия [15], [16]. Тази зависимост е особено важна при пожар, когато освен конструктивните елементи, въздействията могат косвено да повлияят и върху общата устойчивост на сградната система.

В международната научна литература явлението взривно обрушване се разглежда като един от основните механизми за ускорена загуба на пожароустойчивост при стоманобетонни конструкции. Изследванията показват, че при бързо повишаване на

температурата вътрешните напрежения, породени от температурните градиенти и парното налягане, могат да предизвикат внезапно отделяне на защитния бетонен слой, което води до ускорено нагряване на армировката и значително намаляване на остатъчната носимоспособност [1], [2], [3], [4], [5]. Съгласно нормативните документи за пожарно оразмеряване и изпитване на конструкции [6], [7], [8], това явление следва да бъде отчитано при оценката на пожарната устойчивост, особено при високоякостни бетони и конструкции, подложени на интензивно термично въздействие. От съществено значение за общата сигурност на сградите е и съобразяването с изискванията за сеизмични въздействия и осигуряването на геометрична регулярност на конструкцията срещу усукване [23]. За целта в инженерната практика масово се прилагат утвърдени методики за проектиране на нови обекти [21], както и за оценка и сеизмично усилване на съществуващи сгради [22] съгласно действащата система от стандарти Еврокод.

3. Теоретична постановка на проблема

При възникване на пожар в сградите носещите стоманобетонни конструкции са подложени на интензивно и неравномерно температурно въздействие, което води до съществени изменения в тяхното напрегнато-деформационно състояние. Вследствие на температурния градиент между повърхностните и вътрешните слоеве на бетона се формират значителни вътрешни напрежения, породени от ограниченото термично разширение на материала. Тези напрежения се комбинират с прогресивното намаляване на якостните характеристики на бетона и армировката при повишаване на температурата.

Паралелно с термомеханичните процеси в бетонната структура протичат и сложни термохидрални явления, свързани с изпарението на влагата в порестата среда. При бързо нагряване образуваната водна пара не може да се евакуира достатъчно бързо, което води до рязко повишаване на вътрешното налягане. Комбинираното действие на термичните напрежения и парното налягане създава предпоставки за локално разрушаване на повърхностните слоеве на бетона.

Това явление, известно като взривно обрушване, представлява внезапно и често взривообразно отделяне на части от защитния бетонен слой (фиг.1). То се счита за един от най-опасните механизми при пожарно въздействие, тъй като води до рязко намаляване на ефективното сечение на конструктивния елемент и значително ускорява

топлинното въздействие върху армировката. В резултат се наблюдава ускорена загуба на носимоспособност, намаляване на пожароустойчивостта и увеличаване на вероятността от локален или прогресивен конструктивен отказ.

Степента на развитие на взривно обрушване зависи от редица фактори, сред които основно значение имат влагосъдържанието в бетона, плътността на структурата, скоростта на температурно нарастване, нивото на външно натоварване и условията на гранично ограничение на деформациите. Особено чувствителни към това явление са високоякостните бетони, при които по-ниската пропускливост затруднява отвеждането на водните пари и увеличава риска от вътрешно разрушаване.



Фиг. 1. Схематично представяне на механизма на взривно обрушване при пожарно въздействие върху стоманобетонен елемент

4. Влияние на взривното обрушване на бетон върху носимоспособността на стоманобетонните елементи

Взривното обрушване оказва пряко влияние върху носимоспособността на стоманобетонните конструкции, като променя както геометричните характеристики на

напречното сечение, така и условията на топлинен пренос към армировката. При загуба на част от защитния бетонен слой ефективната дебелина на покритието намалява, което значително ускорява повишаването на температурата в армировъчната стомана.

Този процес води до съществено изменение на механичните свойства на армировката. С увеличаване на температурата настъпва прогресивно намаляване на границата на провлачване, модула на еластичност и якостта на стоманата. В резултат се понижава способността на елемента да поема огъващи моменти, напречни сили и осови усилия. Особено критично е това при носещи греди, колони и плочи, където локалната загуба на носимоспособност може да предизвика преразпределение на усилията в конструктивната система.

При стоманобетонните колони ефектът е още по-съществен, тъй като освен намаляването на якостта на армировката и бетона, се наблюдава и намаляване на коравината на елемента. Това води до увеличаване на деформациите и повишаване на риска от загуба на устойчивост. При статично неопределими системи тези процеси могат да доведат до развитие на вторични вътрешни усилия и ускорено формиране на пластични зони.

Особено опасен е случаят, при който взривното обрушване се развива несиметрично по сечението. Тогава се създават допълнителни ексцентрицитети на натоварването, което води до неравномерно разпределение на напреженията и повишава вероятността от локален конструктивен отказ. Това е характерно при локализирани пожари, където температурното въздействие не е равномерно по всички страни на елемента.

От гледна точка на пожарната безопасност, загубата на носимоспособност вследствие на взривно обрушване е особено критична, тъй като значително намалява времето за безопасна евакуация и увеличава риска от прогресивно разрушаване на цялата конструктивна система. Поради това оценката на това явление следва да бъде неразделна част от анализа на пожарната устойчивост на сградите.

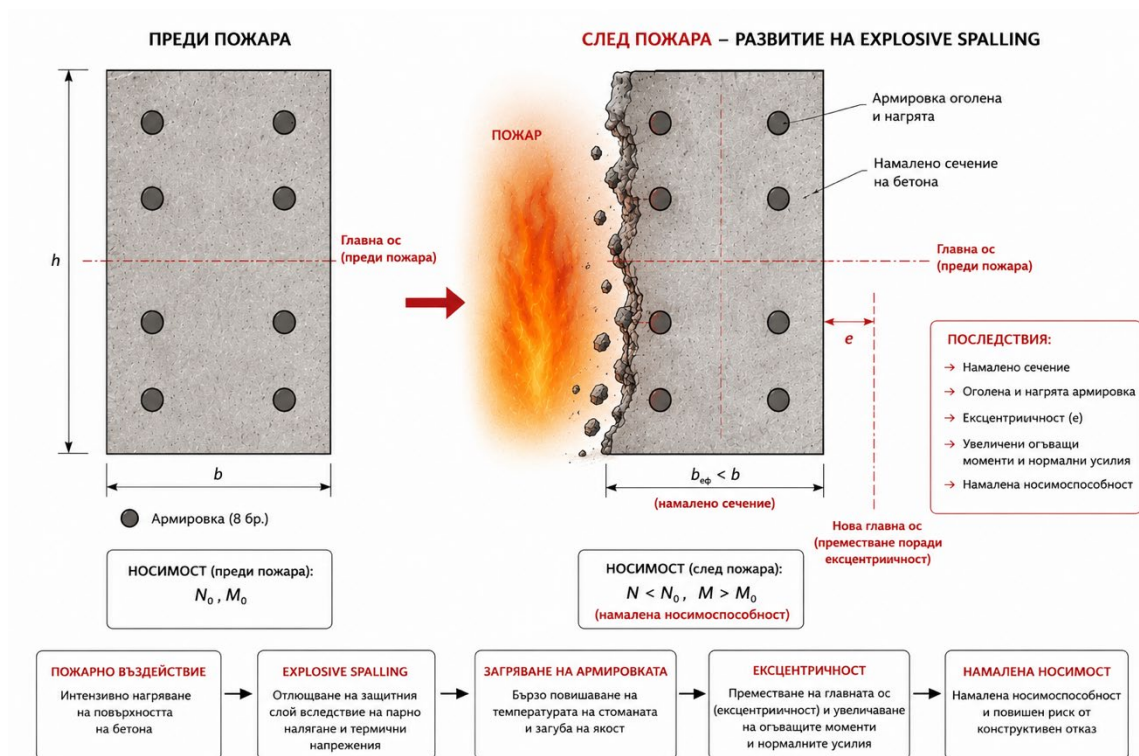
5. Илюстративен пример

За илюстриране на влиянието на взривно обрушване върху носимоспособността е разгледан стоманобетонен елемент с правоъгълно напречно сечение, подложен на едностранно пожарно въздействие. В процеса на нагряване външният бетонен слой е изложен на интензивен температурен поток, което води до формиране на високи температурни градиенти между повърхността и вътрешността на сечението.

Под въздействието на високата температура и натрупването на вътрешно парно налягане настъпва локално разрушаване и отделяне на части от защитния бетонен слой. В резултат армировката остава частично или напълно оголена и директно изложена на огневото въздействие. Това значително ускорява нейното нагряване и води до по-бързо намаляване на механичните ѝ характеристики.

Схематично това явление е представено на фиг. 2, където се наблюдава намаляване на ефективното напречно сечение, оголване на армировката и увеличаване на дълбочината на топлинното проникване. Вследствие на тези процеси се нарушава нормалното разпределение на напреженията в сечението и се понижава способността на елемента да поема вътрешни усилия.

Анализът показва, че развитието на взривно обрушване води до съществено намаляване на носимоспособността, повишаване на деформациите и увеличаване на риска от локален конструктивен отказ. Това явление има пряко отражение върху пожарната устойчивост на сградите, тъй като съкращава времето до достигане на критично състояние и намалява възможността за безопасна евакуация и аварийна намеса.



Фиг.2 Носеща колона от сграда преди и след пожара и развитие на явлението взривно обрушване

Вследствие на несиметричната загуба на част от напречното сечение настъпва изместване на главната ос на елемента, което води до възникване на ексцентричност на приложеното натоварване. Това от своя страна поражда допълнителни огъващи моменти, които преди пожарното въздействие не са съществували, тъй като елементът е бил натоварен централно на натиск и в бетонното сечение не са възниквали опънни напрежения.

6. Анализ на пожарната опасност, научна хипотеза и мерки за защита

На базата на проведеното изследване може да бъде формулирана следната научна хипотеза: развитието на взривно обрушване при пожарно въздействие представлява съществен фактор за ускорена загуба на носимоспособност на стоманобетонните конструкции, като вследствие на намаляване на ефективното сечение, оголване на армировката и възникване на допълнителна ексцентричност се създават условия за преждевременно конструктивно разрушаване.

Потвърждаването на тази хипотеза показва, че пожарната опасност не се изразява единствено в директното температурно въздействие върху конструктивния елемент, а в развитието на вторични механизми на разрушение, които съществено променят първоначалната статическа работа на конструкцията. Възникването на допълнителни огъващи моменти, съчетано със загубата на защитния бетонен слой, ускорява достигането на критично състояние и увеличава риска от локален или прогресивен отказ.

От инженерна гледна точка ограничаването на това явление изисква прилагането на комплекс от конструктивни и технологични мероприятия за повишаване на пожарната устойчивост. Особено ефективно средство е използването на *полипропиленови влакна в бетонната смес*, които при повишаване на температурата се стопяват и създават допълнителни канали за *освобождаване на водната пара*, като по този начин намаляват вътрешното налягане. Практиката показва, че този подход значително намалява вероятността от взривно обрушване.

Друга важна мярка е *увеличаването на дебелината на защитния бетонен слой*, което осигурява по-голямо време за топлинна защита на армировката и забавя достигането на критични температури. При конструкции с повишена пожарна опасност е целесъобразно използването на бетони с контролирана порьозност и оптимизирано влагосъдържание, с което се намалява възможността за натрупване на високо вътрешно парно налягане.

Съществено значение имат и организационно-техническите мероприятия, включващи правилна оценка на пожарния риск още на етапа на проектиране, избор на подходящ клас на пожароустойчивост, осигуряване на пасивна противопожарна защита и периодичен технически контрол на конструктивните елементи. Комплексното прилагане на тези мерки значително повишава надеждността на сградите и намалява вероятността от аварийни последици при пожар.

7. Заключение

Проведеното изследване показва, че явлението взривно обрушване представлява съществен фактор за намаляване на пожарната устойчивост на стоманобетонните конструкции. В резултат на внезапното разрушаване на защитния бетонен слой настъпва ускорено нагряване на армировката, намаляване на ефективното напречно сечение и

промяна в напрегнато-деформационното състояние на елементите. Особено опасно е възникването на ексцентричност, което води до поява на допълнителни огъващи моменти и увеличаване на вътрешните усилия, ускоряващи достигането на критично конструктивно състояние.

Получените резултати потвърждават, че взривно обрушване не следва да се разглежда като локален повърхностен дефект, а като механизъм с пряко влияние върху общата носимоспособност и конструктивна надеждност на сградите при пожар. Това налага неговото задължително отчитане при инженерната оценка на пожарната опасност и при проектирането на стоманобетонни конструкции.

Съществено значение за ограничаване на риска имат превантивните конструктивни и технологични мерки, сред които особено ефективни са използването на полипропиленови влакна в бетонната смес, увеличаването на дебелината на защитния бетонен слой, оптимизирането на порьозността и влагосъдържанието на бетона, както и правилният избор на клас на пожароустойчивост. Комплексното прилагане на тези мероприятия повишава устойчивостта на конструкциите, ограничава развитието на взривно обрушване и създава по-висока степен на безопасност за сградите и техните обитатели.

ЛИТЕРАТУРА:

- 1.Venkatesh Kodur, Mohammad B. Dwaikat, *A numerical model for predicting the fire resistance of reinforced concrete beams considering concrete spalling*, Engineering Structures, Vol. 30, Issue 10, 2008, pp. 2916–2928;
- 2.W. Klingsch, *Explosive spalling of concrete in fire – a review*, International Journal of Protective Structures, Vol. 5, No. 3, 2014, pp. 283–302;
- 3.M. Hedayati, Venkatesh Kodur, *A review on fire-induced spalling of concrete members*, Fire Safety Journal, Vol. 69, 2015, pp. 24–35;
- 4.Y.H. Amran et al., *Fire spalling in high-strength concrete: mechanisms, influencing factors and mitigation strategies*, Journal of Building Engineering, Vol. 45, 2022, Article 103525;
- 5.Kirnbauer, J. Kollegger, *Explosive spalling of concrete under fire load: A review on experimental research*, Fire Technology, Vol. 59, 2023, pp. 1579–1618;

6. International Organization for Standardization, ISO 834-1: Fire-resistance tests — Elements of building construction — Part 1: General requirements, Geneva, Switzerland;
7. European Committee for Standardization, EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-2: General rules — Structural fire design, Brussels, Belgium;
8. National Fire Protection Association, NFPA 5000: Building Construction and Safety Code, Quincy, Massachusetts, USA;
9. Тризлова Н.Д., А.Киров, Особенности на техниката на безопасност на станция "Калцинатация" на Solvey - SODI - гр.Девня при производство на калцинирана сода, Научен алманах на ВСУ "Ч.Храбър", серия Архитектура и строителство, 2010, Варна, ISSN 1311-9222 (кн.4);
10. Киров А., Н.Д. Тризлова, Проблеми при обезпечаване безопасни условия на труд при експлоатация на системи и съдове, работещи при високо налягане и температура, Научен алманах на ВСУ "Ч.Храбър", серия Архитектура и строителство, 2010, Варна, ISSN 1311-9222 (кн.4);
11. Мустафа Йоздоган, Нели Тризлова, Изследване техниката на безопасност на труда в производството на пластмасови изделия чрез шприцоване, VII Международна научна конференция "Архитектура, строителство – съвременност", 2015 г., Варна, България; ISSN 2367-7252;
12. Ali Cinar, Neli Trizlova, Safety engineering in the construction sector, VII international scientific conference, "Architecture, civil engineering – modernity", 2015, Varna, Bulgaria, ISSN 2367-7252;
13. Ozdemir D., Demir M., Hocaoglu I.H., Turgut O., Panicharov G., Kirov A., Georgieva A., Trizlova N., Chakar A., Study on asbestos dismantling and personal protective equipment usage in construction sector, , VII international scientific conference "Architecture, civil engineering – modernity", 2015, Varna, Bulgaria, ISSN 2367-7252;
14. Osman Turgut, Neli Trizlova, Safety at the work of rescue crews in GSM base stations, International conf. of civil engineering, IX, Варна, 2016, ISBN 978-954-92866-7-0;
15. Пейчев. В., Д.Димитров, А.Киров, Н.Тризлова, Влияние на подземните води върху якостно – деформационните свойства на свързани строителни почви, V-та международна научна конференция Архитектура, строителство – съвременност, 2011, Варна, ISSN 1314-3816;
16. Паничаров Г., Н.Тризлова, Динамика на свлачищни процеси при динамични въздействия, 6-та международна научно – приложна конференция: „Архитектура, строителство – съвременност”, ВСУ „Ч.Храбър”, Варна, 2013, ISSN: 1314-3816

17. Михалева, Д., Павлов, Ив., Игнатиев, Н., Носеща способност на срязване при усилване на стоманобетонни греди със странични вертикални ивици от армиран с карбонови влакна полимер съгласно БДС EN 1998-3:2005 и ACI 440.2R-08, Научен алманах на ВСУ "Черноризец Храбър", серия „Архитектура и строителство”, кн. 5, Варна, стр. 36-45, 2011, ISSN: 1311-9222, 1313-7239;
18. Павлов, Ив., Михалева, Д., Игнатиев, Н., Носеща способност на срязване при усилване на стоманобетонни греди с U-образни вертикални ивици от армиран с карбонови влакна полимер съгласно БДС EN 1998-3:2005 и ACI 440.2R-08, Научен алманах на ВСУ "Черноризец Храбър", серия „Архитектура и строителство”, кн. 5, Варна, стр. 46-56, 2011, ISSN: 1311-9222, 1313-7239;
19. Михалева Д., Павлов Ив., Еквивалентна правоъгълна работна диаграма на ограничен бетон, VIII Международна научна конференция по архитектура и строителство ArCivE 2017, Варна, стр. 308-314, 2017, ISSN: 2535-0781;
20. Павлов Ив., Михалева Д., Носимоспособност на огъване на стоманобетонни греди с правоъгълно напречно сечение и ограничена натискова зона, VIII Международна научна конференция по архитектура и строителство ArCivE 2017, Варна, стр. 315-319, 2017, ISSN: 2535-0781;
21. Сотиров, П., Игнатиев, Н., Михалева, Д., Павлов, И., Практическо ръководство с решени примери по прилагането на Еврокод 8-1 - Проектиране на конструкции за сеизмични въздействия (Нови сгради), КИИП, София, 2012, ISBN: 978-954-92275-5-0;
22. Васева, Е., Сотиров, П., Игнатиев, Н., Михалева, Д., Павлов, И., Практическо ръководство с решени примери по прилагането на Еврокод 8-3 - Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия, трета част (Оценка и усилване на сгради), КИИП, София, 2012, ISBN: 978-954-92275-9-8;
23. Михалева, Д., Павлов, Ив., Игнатиев, Н., Критерий за хоризонтална регулярност в случай на усукване, Международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения и приложение на Еврокодовете”, Варна, стр. 192÷200, 2010, ISSN: 1314-6955 (print), 2603-4255 (CD/DVD);