



Получена: 30.12.2022 г.

Приета: 13.02.2023 г.

## ЕКСПЛОАТАЦИОННИ ПРОБЛЕМИ НА НОСЕЩИТЕ СТОМАНОБЕТОННИ КОНСТРУКЦИИ СЛЕД ПОЖАРНО ВЪЗДЕЙСТВИЕ

Б. Петров<sup>1</sup>, И. Дойков<sup>2</sup>, С. Бояджиев<sup>3</sup>

*Ключови думи: пожарно въздействие, термоиндикатори, стоманобетон*

### РЕЗЮМЕ

Размерът на щетите след пожар зависи главно от интензивността на пожарното въздействие и продължителността. Дългите периоди на температурно въздействие предизвикват промени на физико-химичните свойства на бетона, последвани от редуциране на механичните характеристики.

Анализирани са обекти, различаващи се по предназначение, клас на бетона по якост на натиск, дебелина на бетоновото покритие, максимална температура в огнището на пожара и продължителност на пожарното въздействие. Представени са методите за оценка на конструкциите след пожарно въздействие.

В настоящото изследване е представено изменението на якостните и деформационните свойства на бетона в резултат на огневи въздействия с различен интензитет и продължителност. Въз основа на естествените термоиндикатори на бетона е установена вероятната температура на пожарното въздействие. Установена е експериментална зависимост за изменение на якостта на натиск на бетона във функция на температурата. Чрез ултразвукова диагностика е установено изменението на модула на еластичността на бетона.

---

<sup>1</sup> Богомил Петров, проф. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [bwp\\_fce@uacg.bg](mailto:bwp_fce@uacg.bg)

<sup>2</sup> Иван Дойков, доц. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [idoikov\\_fce@uacg.bg](mailto:idoikov_fce@uacg.bg)

<sup>3</sup> Симеон Бояджиев, инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: [sboyadjiev\\_fce@uacg.bg](mailto:sboyadjiev_fce@uacg.bg)

## 1. Въведение

Изследванията на измененията на свойствата на бетона при пожарни въздействия винаги са били водещи за строителните специалисти [1]. До 80-те години на миналия век хипотезата за висока устойчивост на стоманобетонните конструкции по време на пожар е изключително актуална [2, 3], но по-късно се установяват редица съществени експлоатационни проблеми. Обезпечаването на обществената безопасност след пожар изисква незабавна и задълбочена оценка за влиянието на огневото въздействие. Оценката включва анализ на резултати от визуално обследване, ултразвукова диагностика, петрографско изследване, локализиране на силно и слабо засегнатите зони от конструкцията, необходимост от отстраняване на силно дефектирани елементи и определяне на структурния капацитет на конструкцията.

В зависимост от интензивността на пожара и температурните нива се установяват промени в цвета на бетона, намаляване на якостта, микропукнатинообразуване, намаляване на модула на еластичност, нарушаване на сцеплението с армировъчните пръти, редуциране на якостта на опън на стоманата, загуба на предварително налягане и др. Повишените температури водят до изменения на микроструктурата на бетона, в резултат на дехидратация на циментовия камък, промяна на контактната зона с добавъчните материали и др. [4]. Това изисква конструктивен анализ за промяна на механичните характеристики на бетона и стоманата с цел установяване на остатъчния капацитет на конструкцията, с цел изготвяне на правилна диагноза за възстановяване.

Бетонът е материал с относително висока пожароустойчивост и дори при интензивни пожари съществуват надеждни опции за възстановяване, което е сериозна алтернатива на пълното разрушаване на конструкцията [5]. Според [6] за оценката се прилагат две методологии. Първата е свързана с оценка на качеството на бетона, а втората е свързана с оценка на интензивността на пожарното въздействие чрез температурни профили, числени методи и оценка на носимоспособността на конструкцията. Отчитат се и измененията на материалите при охлаждане [7]. За определяне на интензитета и разпространението на пожара се използват историята на пожара, видео кадри, информация от пожарникари и очевидци. В допълнение се използват емпирични уравнения или компютърно моделиране за оценка на тежестта на пожара въз основа на пожарния товар в сградата, вентилационните условия, разпространение на пожара и свойствата на облицовки за стени. Важно е да се отбележи, че развитието на температурата в истински пожар се различава от стандартната температурно-времева крива по ISO-834.

Микроструктурните изменения налагат въвеждането на по-консервативни стойности на коефициентите за редукция на механичните характеристики на материалите, посочени в [8], въпреки че нормативните зависимости не отчитат ефектите на пълзенето и бързото охлаждане на елементите на конструкцията при гасене [9].

В [10] чрез ултразвукова диагностика и лабораторни изпитвания е изследвано влиянието на температурата върху статичните и динамичните характеристики на бетона. Установена е връзката между статичните и динамичните модули на еластичност, както и по-интензивно редуциране на модулите в сравнение с якостта. Получените зависимости съответстват на известните зависимости за връзка между двата модула при нормална температура.

В [11] е обобщена методологията за оценка на повредите при конструкции, засегнати от пожарно въздействие. Остатъчната якост на натиск на бетона след бързо охлаждане се различава в зависимост от максималната достигната температура, продължителността на въздействието, състава на бетона, вида на добавъчните материали

и условията на натоварване по време на пожарното въздействие. Наличието на минерални добавки подобрява устойчивостта на огневото въздействие при сух бетон [12]. При водонаситени бетони ефектът намалява. Микросилициевият прах увеличава плътността на бетона, намалява паропропускливостта и интензифицира повърхностните разрушения.

Цветът на бетона се променя в резултат на нагриване, което е видимо при визуална инспекция. Промените в цвета са най-силно изразени за силициевите добавъчни материали и по-малко при варовик, гранит и гранулирана шлака [6]. Трябва също да се отбележи, че циментовата паста също може да промени цвета си при карбонизация и това не трябва да се смесва с промяна на цвета, предизвикана от топлинното въздействие. Използван е и термолуминисцентен анализ, който е по-чувствителен при анализ на дефектирани конструкции [13]. В [14] са разгледани различните концепции за ремонт, гарантиращ както безопасна употреба за дълъг период от време, така и висока скорост на реализиране.

В [15] се потвърждава редуциране на механичните свойства и модула на еластичността в зависимост от различни експериментални условия, пропорции на бетонната смес, температури, период на съхраняване след пожар и режими на втвърдяване след пожар. Получени са корелационни изчислителни уравнения. В [16] се посочва, че високата температура уврежда микро- и мезоструктурата на бетона, като е установено влиянието на водоциментовото отношение, видът на добавъчния материал, минералните добавки и наличието на фибри. Повишената топлопроводимост на стоманата определя по-голяма деформация, отколкото на бетона, което води до поява на пукнатини в контактната зона. Подобен ефект се наблюдава и при неравномерните деформации на циментовия камък и добавъчните материали.

Повърхностните обрушвания зависят от парциалното налягане на изпаряващата се физически и химически свързана вода в бетона, обемни изменения на добавъчните материали и нарушаване на контакта бетон-армировка [17]. Това зависи от количеството влага, скоростта на нагриване, разпределението на порите, наличието на свързани пори и якостта на опън на бетона. В [18] като причина за пукнатините се посочват пластмасовите фиксатори в бетона.

Температурните деформации водят до напречни деформации на колони и междуетажни плочи, поява на ексцентрицитет [19]. Те не се възстановяват след охлаждане и пораждат по-големи моменти на огъване.

Ефектът от повишените температури върху остатъчната якост на стоманата е изследван в [20, 21]. Редуцирането на якостните характеристики се възстановява при топлинно въздействие до 450 °C за студено обработена стомана и до 600 °C при гореща валцувана стомана. След излагане на особено високи температури настъпват и структурни промени. Ефектът от високата температура е по-критичен за стоманата с предварително напрежение. При 400 °C загубите в напрегателното напрежение достигат 50 %. Редуцирането на модула на еластичност в бетона и увеличената релаксация поради пълзене увеличава загубата на напрежение [22]. Температура и продължителността на въздействието са далеч по-критични, отколкото при бетона.

Бетонното покритие на армировката е един от най-важните фактори, влияещи върху огнезащитната способност. Така например при температура на повърхността 615 °C и дебелина на покритието 45 mm температурата на стоманата е 378 °C [23]. В [24] са посочени кривите за редуциране на якостта на бетона, както и пълната работна диаграма на бетона при различни температурни режими

В [25] е представен параметричен анализ по крайни елементи на предварително напрегнат стоманобетонен мост след излагане на пожар. Анализират се резултати от визуална проверка, фото прегледи и безразрушително изпитване на бетона. Оценени са температурите на различни дълбочини.

В [26] се дава практическа рамка за проектиране на мостови конструкции при пожари, предизвикани от експлоатацията. Детайлно са дефинирани сценариите за пожар, структурно-термичен анализ, нивата на пожароустойчивост и процесите на оценка на разходите за поддръжка. Извършен е анализ на риска.

В [27] е изследвана мостова конструкция с предварително напрегнати греди и монолитна мостова плоча. Представени са резултати от тестово натоварване с подвижен автомобилен товар. Предварително напрегнатите и последващо напрегнатите бетонни елементи са по-чувствителни към повреди по време на пожар. Устойчивостта намалява до около 60 % [28] и може да настъпи разлепване [29, 30].

Необходимо да се формулира стратегия за конструктивното проектиране на ремонтираната част на сградата или съоръжението, която е съвместима с оригиналния проект. При възстановяването трябва да бъдат отчетени влошените механични и деформационни характеристики на вложените материали, неравномерното пожарно въздействие в различните зони на конструкцията, влошената съвместна работа на бетона и армировката, както и потенциално влошената дълготрайност.

## **2. Методика на изследване**

За диагностициране на състоянието на конструкциите се използват различни обектови и лабораторни изпитвания. Техниките, провеждани на място, включват визуална инспекция, безразрушително изпитване, изрязване на проби от бетон и армировка, прилагане на акустични и ултразвукови методи и др.

### **2.1. Визуална инспекция на елементите на носещата конструкция**

При визуалното обследване се документират наличните дефекти, пукнатини и повреди в елементите на конструкцията, установяват се участъци с открита армировка, промени в структурата на бетона, зони с нарушено сцепление между зърната на матрицата, зони с изнесен калциев хидроксид от структурата на циментовия камък на бетона, настъпили промени в структурата на добавъчните материали, както и промяна на цвета на бетона в дълбочина на напречното сечение. Границата за оцветяване в розово се осъществява при температура 300 °C [31]. Установяват се недопустими деформации и взаимни премествания в отделни конструктивни елементи в резултат на огневото въздействие. Изследва се структурата на бетона за установяване на зони с десортиран или разслоен бетон, наличие на макро- и микропукнатини в зоната на бетоновото покритие, промяна на плътността на бетона в дълбочина на сечението, взривообразни разрушения, нарушаване на сцеплението с носещата армировка и др. По време на огледа се установяват степен на изгаряне на пластмасови фиксатори, промяна на тоналността при удар по бетоновата повърхност и др. Чрез естествените термоиндикатори на бетона се цели да се прогнозира температурата по време на огневото въздействие.

### **2.2. Петрографско изследване**

Прилага се микроскопски анализ за определяне на вида на основните минерали, разпределението на добавъчните материали, типа и съдържанието на цимента, наличието на минерални добавки, водоциментовото отношение, съдържанието на въздушни пори, дълбочината на карбонизация, наличието на дефекти, идентифицирането на алкало-силициева реакция и др. Чрез петрографското изследване се определя историята на

нагриването, оценява се температурата на пожара и се изчертават изотермалните линии въз основа на естествените термоиндикатори на бетона.

Прилагат се също цифров анализ на цветовете [16, 38] или остатъчната термолуминесценция [13]. Пробите са изследвани в отразена светлина, като е определен нюансът, наситеността и интензитетът на цвета. Измерването на нюанса е полезно и дава възможност за количествено определяне на цвета при различни температури. Тази техника превъзхожда използваната в момента субективна визуална оценка. Недостатъците на петрографското изследване са висока цена и значителна продължителност. Петрографското изследване определя параметрите в качествено изражение, но не дава числови стойности на якостта на бетона и има значителна продължителност. В [32] се предлага нелинейна резонансна вибрация за оценка на контактните дефекти в бетона. Използват се също сканираща електронна микроскопия (SEM) [34] и минералогичен анализ чрез рентгенова дифракция (XRD), диференциален термичен анализ (DTA), термичен гравиметричен анализ (TGA) и производен термогравиметричен анализ, но тези методи не са рутинни за изследване в условията на локален пожар. Въвежда се параметър, наречен коефициент на натрупване на топлина. В [35] се описва нов метод за определяне на температурата при пожара чрез акустично измерване на обезводняването на естествения кварцов пясък, съдържащ се в бетона.

В [36] се посочва, че карбонизацията повишава якостта и ограничава пукнатинообразуването. Установено е, че карбонизацията играе важна роля за възпрепятстване на развитието на микропукнатини преди 600 °С. Според [37] оценката на бетонните конструкции след пожар, обикновено се извършва чрез визуално наблюдение на промяна на цвета, напукване и обрушване.

### **2.3. Якост на натиск на бетона чрез изрязване на сондажни ядки**

Основните видове лабораторни изпитвания са свързани с определяне на обемната плътност и якостта на натиск на вложените в стоманобетоновите елементи бетони.

Определянето на обемната плътност и еднородността на бетона се осъществява в съответствие с изискванията на [39]. Определянето на якостта на натиск на бетона се осъществява чрез изпитване на изрязани от елементите цилиндрични пробни тела (ядки) съгласно изискванията на [40 и 41]. След изчисляване на якостта на натиск на бетона се извършва статистическа обработка на получените резултати с цел оценяване на класа на бетона по якост на натиск за различните групи елементи и засегнатите зони в тях. Окачествяването на бетоните се осъществява, като се диференцира редуцията на якостта на натиск във и извън зоната на огневото въздействие. Изчислява се коефициентът за съгласуване на стандартните зависимости съгласно [42].

### **2.4. Якост на натиск на бетона чрез определяне на големината на отскока**

В [33] е изследвана възможността за оценка на механичните свойства на варовиковия бетон, като се използват безразрушителни методи – ултразвуков, отскок от бетоновата повърхност и метод на резонансната честота. Определена е връзката за оценка на якостта на натиск на базата на измерената торсионна честота. Анализът на дисперсията показва, че влиянието на температурата върху експерименталните резултати, получени от разрушителни и неразрушителни тестове, е силно статистически значимо. В температурния интервал между 400 – 600 °С по-голямата част от измерените стойности

значително се различават. Резултатите са относителни, защото в повърхностния слой на бетона от дехидратацията се повишава твърдостта.

Вероятната якост на натиск на бетона при настоящите измервания се определя чрез измерване на еластичния отскок, съгласно изискванията на [42]. Опитните точки за изпитването се избират от достъпните зони, където повърхностният слой на бетона е максимално запазен и без дефекти след огневото въздействие.

Вероятната якост на натиск на бетона е определена за бетони от елементите в огнището на пожара и такива със същия клас бетон, но в по-отдалечените зони, които се третират като контролни.

## **2.5. Определяне на дълбочината на карбонизация на бетона**

Депасивирането на армировката спада към експлоатационните гранични състояния (Serviceability limit states SLS), които настъпват, когато конструкцията или части от нея не могат да изпълняват свои определени предназначения, без да са на лице преки последици за конструктивната безопасност.

Степента на карбонизация на бетона е определена въз основа на визуален и измерителен контрол в съответствие с изискванията на [43]. Измерителният контрол обхваща: състояние на бетоновото покритие и наличие на характерни пукнатини в него, състояние на армировката, изследване на промяната на рН на бетона и широчина и дълбочина на пукнатините.

Дълбочината на карбонизираната зона на бетона, до която армировката не е защитена от корозия, се определя чрез изрязаните от бетона ядки или чрез отстраняване на част от защитното бетонно покритие.

## **2.6. Ултразвукова диагностика за установяване на пукнатини в бетона, както и зони с непълтна структура**

Дълбочината на разпространение на пукнатини в бетона от носещата стоманобетонна конструкция се определя в съответствие с изискванията на [44]. Наличието на каверни и дефекти в дълбочина на стоманобетонното сечение на конструкцията се извършва чрез ултразвукова диагностика в съответствие с изискванията на [45].

Получените опитни резултати се обработват въз основа на изискванията на [45]. Изчислителната методика е базирана на сравняване на опитните резултати за еднороден без повърхностни дефекти бетон и бетон с дефекти. За наличието на дефекти се съди по редуцирането на скоростта на преминаващия ултразвук, която се изменя във функция на плътността на бетона в сечението.

Въз основа на приведената стойност на скоростта на ултразвука през бетона в дълбочина се съди за неговата еднородност и плътност. За определяне на разуплътняването на бетона в резултат на огневото въздействие и последвалото микропукнатинообразуване изпитването се провежда за елементи от огнището на пожара и елементи, изпълнени от идентични бетони, но отдалечени от мястото на огнево въздействие.

Въз основа на резултатите от проведената ултразвукова диагностика на бетона се определя вероятната стойност на модула на еластичността и динамичния модул на еластичността. Използваните за изчислението формули са както следва:

$$E = 1,25.E_{dyn} - 19000, \quad (1)$$

$$E_{dyn} = V_{long}^2 \frac{\rho (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{g (1 - \mu)} 10^{-5}, \quad (2)$$

където  $V_{long}$  е скорост на ултразвуковия импулс при надлъжно прозвучаване в m/s;

$\rho$  – плътност на бетона в kg/m<sup>3</sup>;

$\mu$  – коефициент на Поасон;

$g$  – земно ускорение 9,81 m/s<sup>2</sup>;

$E_{dyn}$  – динамичен модул на еластичността в МРа.

## 2.7. Механични характеристики на армировъчни стомани

От най-силно дефектиралите елементи са изрязани пробни образци, които не застрашават целостта и носимоспособността на конструкцията. В съответствие с изискванията на [46] са оформени пробни тела, които са изпитани на опън. Физико-механичните характеристики на армировъчните стомани граница на провлачване ( $R_e$ ) и якост на опън ( $R_m$ ), както и деформационната характеристика обща относителна деформация при максимална сила ( $A_{gt}$ ) са определени в съответствие с изискванията на [47]. Оценката на изпитаните армировъчни стомани се осъществява въз основа на изискванията на [48]. Въз основа на получените резултати се оценява промяната на физико-механичните характеристики на стоманата и класа по дуктилност.

## 2.8. Микрометрично определяне на деформациите на стоманени телове от предварително напрегнати въжета

В резултат на температурното въздействие се очаква определено релаксиране на стоманата от напрегащи въжета на гредите и редуциране на напрегаща сила в тях. С цел установяване на тази редукция, след разкриване на едно от напрегащите въжета на най-силно засегнатата от пожарното въздействие греда се определя база от 150 mm, която се маркира с трайни марки. Струните последователно се срязват и след пълно затихване на деформациите в тях се определя разстоянието между марките с точност 0,01 mm. Въз основа на получените резултати за изменение на дължината на базата се определя относителната надлъжна деформация. Въз основа на реализираната относителна надлъжна деформация и базовите производствени характеристики на теловете от напрегащите въжета се съди за вероятната остатъчна напрегаща сила във въжето след реализиране на пожарното въздействие.

## 3. Описание на обследваните обекти

В изследването се анализират експерименталните резултати от четири специално избрани обекта със стоманобетонната носеща конструкция. Същите се различават по предназначение, клас на бетона по якост на натиск, дебелина на бетоновото покритие на обследваните елементи, достигната температура и продължителност и интензивност на пожарното въздействие. Обектите са както следва:

- Обект А – жилищна сграда в гр. София с монолитна носеща стоманобетонна конструкция, състояща се от носещи колони, греди, противоземетръсни

вертикални елементи и междуетажни плочи. Елементите на носещата конструкция са изпълнени от бетон с клас по якост на натиск С25/30. Огневото въздействие е локално, възникнало в резултат на битов пожар. Продължителността на пожарното въздействие е около 50 минути. Вж. фиг. 1 и фиг. 2.

- Обект Б – жилищна сграда от смесен тип с магазини и подземни гаражи. Носещата конструкция е монолитна стоманобетонна, състояща се от колони греди, противоземетръсни вертикални елементи и междуетажни плочи. Елементите на носещата конструкция са изпълнени от бетон с клас по якост на натиск С16/20. Огневото въздействие се развива в зоната на магазин за битова химия, в резултат на което интензивността на пожара бързо нараства. Продължителността на пожарното въздействие е около 60 минути. Вж. фиг. 3 и фиг. 4.



Фиг. 1. Обект А – дефекти мазилка



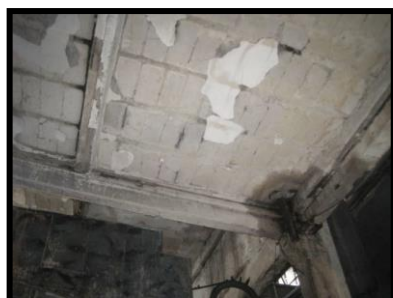
Фиг. 2. Обект А – дефекти плоча



Фиг. 3. Обект Б – дефект покритие колона



Фиг. 4. Обект Б – дефекти плоча



Фиг. 5. Обект В – дефекти плоча

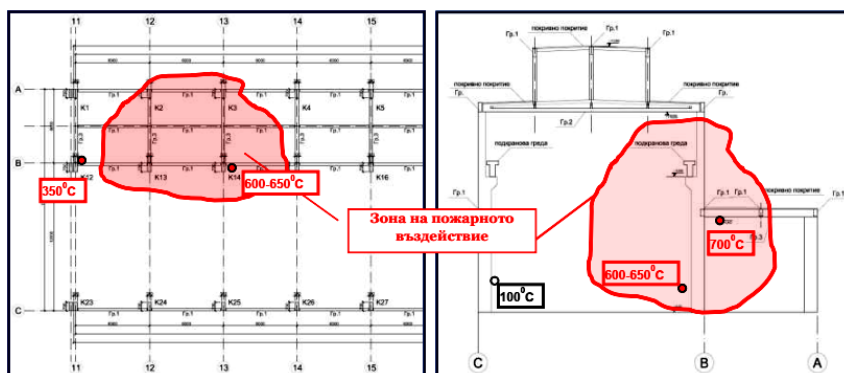


Фиг. 6. Дефект бетоново покритие греда

- Обект В – промишлена сграда в гр. София, предназначена за производство на трансформатори. Носещата конструкция на сградата е сглобяема стоманобетонна с носещи колони, пълностенни покривни греди и панели. Елементите на носещата конструкция са изпълнени от бетон с клас по якост на натиск С25/30. Огневото въздействие се получава в резултат на запалване на вани с трансформаторно масло, в резултат на което интензивността на пожара бързо нараства. Продължителността на пожарното въздействие е около 75 минути. Вж. фиг. 5 и фиг. 6.

На фиг. 7 са посочени изотерми в зоните с най-висок интензитет на пожарното въздействие на обект В.

- Обект Г – мостова конструкция над р. Джерман км 331+160,00 от Автомагистрала „Струма“. Носещата конструкция на съоръжението е монолитна стоманобетонна, състояща се от стълбове с диаметър 100 cm през осово разстояние 540 cm и височина до платното 750 cm, стоманобетонен интегрален ригел, обединяващ стълбовете, с напречни размери 1500/200 cm и сглобяеми, предварително напрегнати стоманобетоннови греди. Монолитните елементи са изпълнени от бетон с клас по якост на натиск С30/37 и класове по експлоатационно въздействие – ХС4 и ХФ1, а сглобяемите греди от бетон клас С45/55 и класове по експлоатационно въздействие – ХС3 и ХФ1. Огневото въздействие се получава в резултат на запалване на отпадъчни продукти и автомобилни гуми. Продължителността на пожарното въздействие е около 270 минути. Вж. фиг. 8 – 11.



Фиг. 7. Зони с най-висок интензитет на пожарното въздействие обект В



Фиг. 8. Обрушено покритие стълб



Фиг. 9. Напукано бетоново покритие стълб



Фиг. 10. Дефектирала армировка

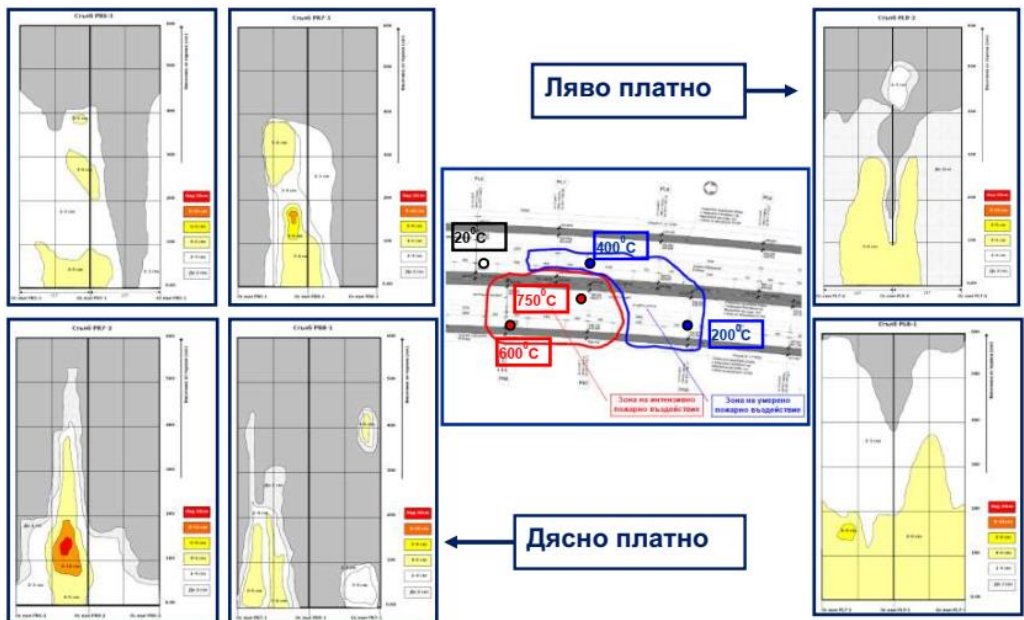


Фиг. 11. Разрушено покритие стълб

На фиг. 12 са посочени изотерми в разгъвката на околната повърхнина на стълбовете на съоръжението на обект Г, подложени на пожарно въздействие с най-висок интензитет.

#### 4. Оценка на пожарното въздействие

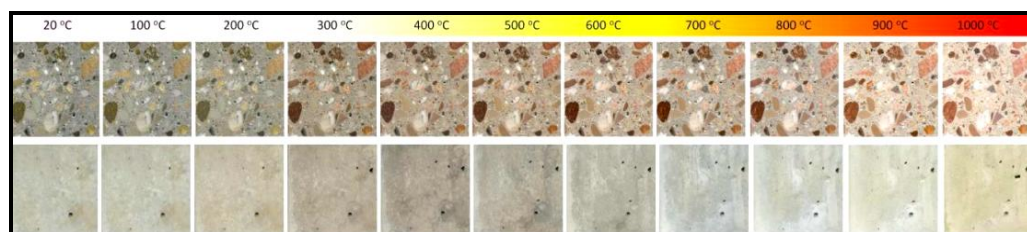
Интензивността на пожарното въздействие е определено в зависимост от продължителността и температурата в огнището на пожара. Интензивността се категоризира като слаба при продължителност до 30 min и температура до 400 °C и умерена при продължителност 30 – 120 min и температура на въздействие от 400 до 800 °C. При надвишаване на тези граници интензивността се категоризира, като повишена и висока. При анализа са отчетени пожарно-техническите характеристики на конструкцията, степента на натоварване, дебелината на бетонното покритие, продължителността на огневото въздействие, както и вида на огнегасителните средства.



Фиг. 12. Зони с най-висок интензитет на пожарното въздействие на стълбове обект Г

Температурата на огневото въздействие е определена по следите от пожара и изменението на материалите. Някои от строителните материали са способни да запомнят изменението на температурата в дълбочина на напречното сечение. По този начин отделни материали изпълняват ролята на естествени термоиндикатори. Прогнозирането на температурата в огнището на пожара е осъществено въз основа на:

- ✓ промяна на цвета на бетона в дълбочина на напречното сечение. Вж. фиг. 13;
- ✓ промяна на характеристиките на добавъчните материали и циментовия камък, както и степента на нарушаване на връзката между тях;
- ✓ понижаване на тоналността на звука при почукване по повърхността на бетона;
- ✓ наличие на микро- и макропукнатини в зоната на бетонното покритие;
- ✓ частично или цялостно разрушаване на бетонното покритие;
- ✓ наличие на взривообразни локални разрушения по повърхността на бетона;
- ✓ нарушаване на сцеплението между бетона и армировката;
- ✓ промяна на физическите, химическите и механическите характеристики;
- ✓ развитие на деформации на стоманобетонните елементи;
- ✓ частично или пълно изгаряне и разрушение на материалите.



Фиг. 13. Промяна на цвета на циментовия камък след огнево въздействие

Установените след анализа обобщени характеристики на пожарното въздействие за отделните обекти – продължителност  $T$ , температура на бетона  $t_c$ , температура на повърхността на армировъчната стомана  $t_A$ , редуциране на якостта на натиск на бетона  $\Delta f_c$  и редуциране на якостта на опън на армировъчната стомана  $\Delta f_A$  – са дадени в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики на пожарното въздействие

№	Обект	$T$ , min	$t_c$ , °C	$t_A$ , °C	$\Delta f_c$ , %	$\Delta f_A$ , %
А	Жилищна сграда, София	50	200 – 400	200 – 250	22,6	5
Б	Смесена сграда Сандански	60	600 – 700	350	26,6	12
В	Промислена сграда, цех за трансформатори, София	120	750	350	42,0 – 55,0	10 – 15
Г	Мост над р. Джерман km 331+160 от АМ Струма	270	850	400 – 450	65,0	10 – 15

## 5. Експериментални резултати

Експерименталните резултати от проведените лабораторни обектови изпитвания за определяне на якостта на натиск на контролен (незасегнат от пожарното въздействие) бетон и бетони от зони с различен температурен товар са посочени в табл. 2.

Таблица 2. Якост на натиск на контролен и дефектирал бетон

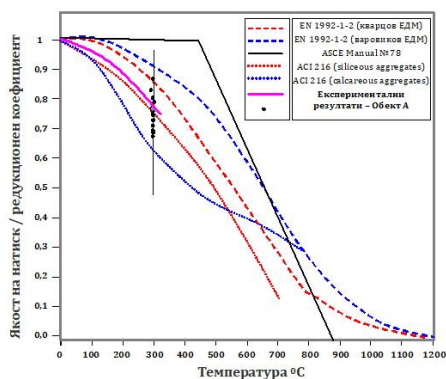
Обект	Клас на бетона	Средна якост на натиск контролен бетон N/mm <sup>2</sup>	Якост на натиск на бетона в N/mm <sup>2</sup> при температура				
			300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	750 °C
Обект А	C25/30	34,25	26,50	–	–	–	–
Обект Б	C20/25	32,42	28,63	23,69	21,52	17,47	–
Обект В	C20/25	34,35	32,60	28,28	–	16,85	–
Обект Г	C30/37	59,61	–	46,51	–	37,49	26,21
Обект Г	C45/55	62,24	56,21	49,24	–	–	–

Експерименталните резултати от проведените лабораторни изпитвания за определяне на модула на еластичността на контролен (незасегнат от пожарното въздействие) бетон и бетони от зони с различен температурен товар са посочени в табл. 3.

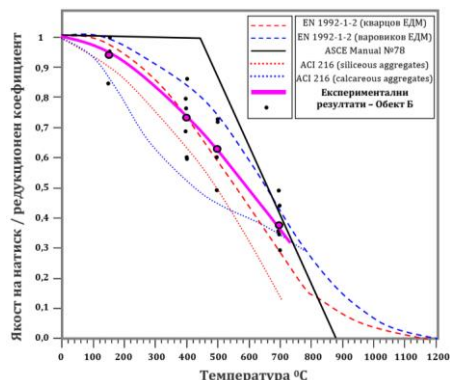
На фиг. 14 ÷ 17 са дадени зависимостите между редуцирането на якостта на натиск на бетона и температурата в огнището на пожара за четирите изследвани обекта.

Таблица 3. Модул на еластичността на контролен и дефектирал бетон

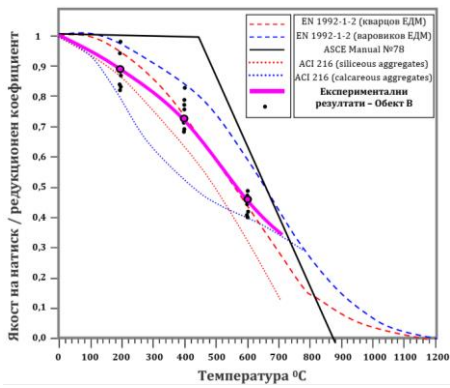
Обект	Клас на бетона	Модул на еластичността на ненарушен бетон N/mm <sup>2</sup>	Модул на еластичността на бетона в N/mm <sup>2</sup> при температура			
			300 °C	400 °C	600 °C	750 °C
Обект А	C25/30	32700	27200	–	–	–
Обект Б	C20/25	27800	17236	14560	8060	6950
Обект В	C20/25	26260	14970	12850	7820	–
Обект Г	C45/55	42650	24310	–	12370	10230



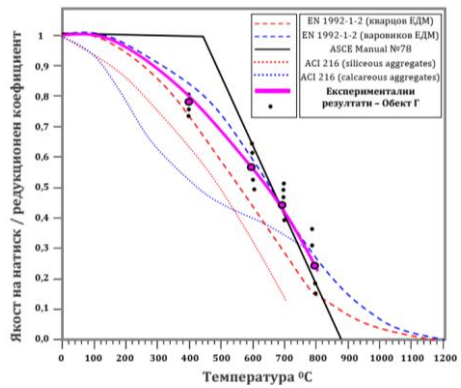
Фиг. 14. Обект А



Фиг. 15. Обект Б



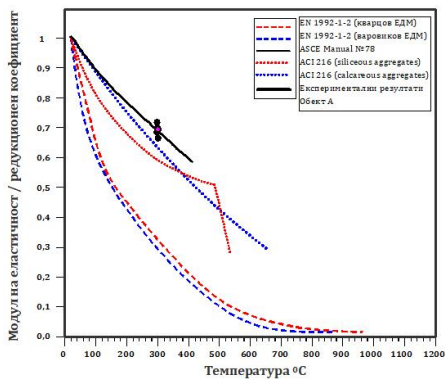
Фиг. 16. Обект В



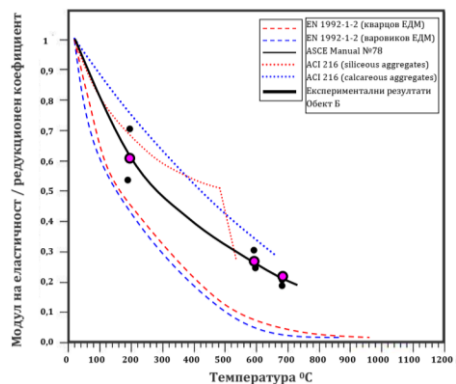
Фиг. 17. Обект Г

Резултатите са сравнени с нормативните зависимости, посочени за различни видове добавъчни материали в [8 и 49].

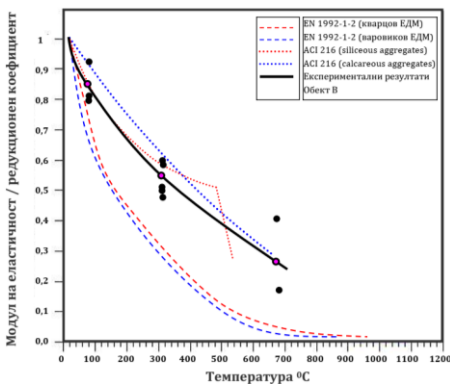
На фиг. 18 ÷ 21 са дадени зависимостите между редуцирането на модула на еластичността на бетона и температурата в огнището на пожара за четирите изследвани обекта. Резултатите са сравнени с нормативните зависимости, посочени за различни видове добавъчни материали в [8 и 49].



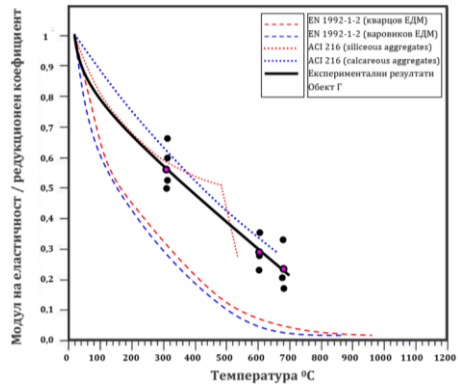
Фиг. 18. Обект А



Фиг. 19. Обект Б

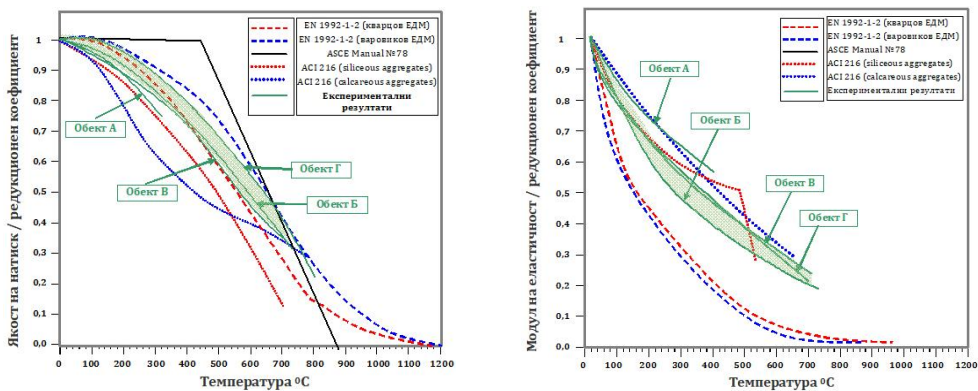


Фиг. 20. Обект В

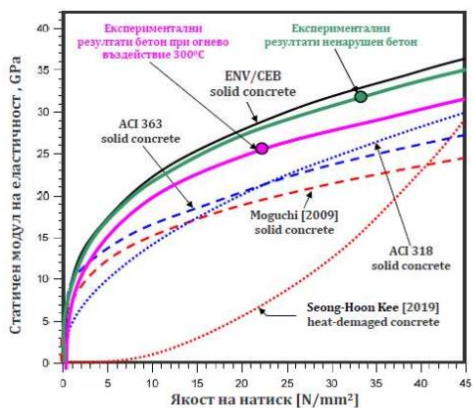


Фиг. 21. Обект Г

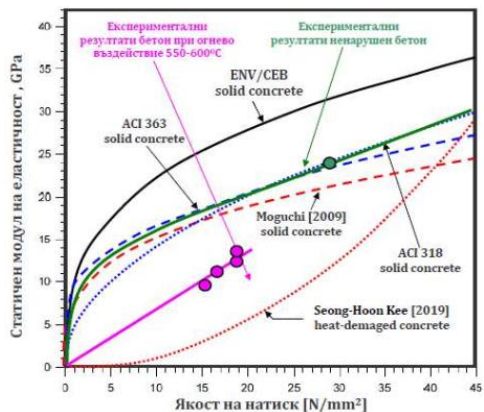
На фиг. 22 са представени графичните зависимости, обобщени за четирите изследвани обекта.



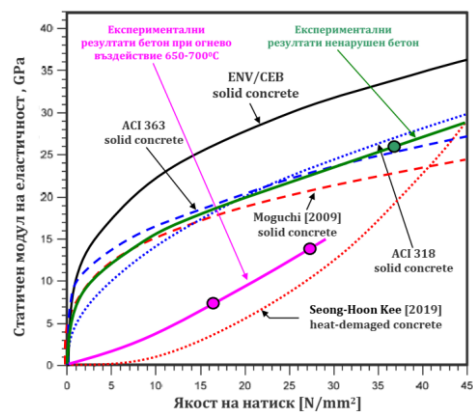
Фиг. 22. Обобщени зависимости температура-якост на натиск и температура-модул на еластичността за четирите обекта



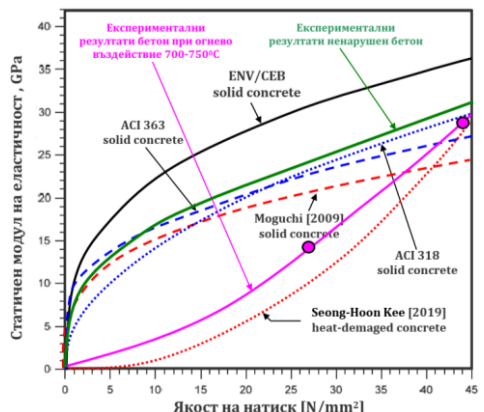
Фиг. 23. Температура 300 °C



Фиг. 24. Температура 550 – 600 °C

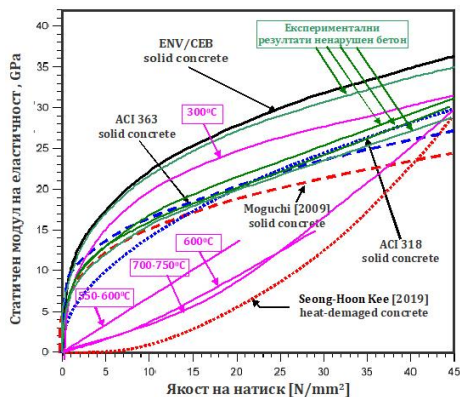


Фиг. 25. Температура 650 – 700 °C

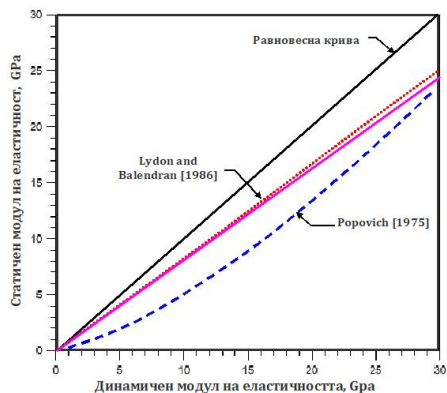


Фиг. 26. Температура 700 – 750 °C

На фиг. 23 ÷ 26 са посочени зависимостите между якостта на натиск на бетона и модула на еластичността за бетони, при различни температури, а на фиг. 27 тези зависимости са обобщени. Получените резултати са сравнени с тези, посочени в [10, 50 ÷ 52].



Фиг. 27. Обобщена зависимост



Фиг. 28. Съотношение  $E-E_{dyn}$

На фиг. 28 е дадена зависимостта между динамичния и статичен модул на еластичността.

В табл. 4 са посочени изчислителните параметри, получени при определяне на редуцирането на напрегателното напрежение в струните на предварително напрегнатите въжета от гредите на обект Г.

Таблица 4. Редуциране на напрегателното напрежение

Пробно тяло	Клас стомана	Площ на напречното сечение, mm <sup>2</sup>	База преди срязване, mm	База след срязване, mm	Относително надлъжно свиване	Вероятно напрежение, N/mm <sup>2</sup>	Вероятна сила, kN
1	Y1860S7	19,625	150	148,68	0,0088	1762,85	34,59
2	Y1860S7	19,625	150	148,37	0,0108	2176,86	42,72
3	Y1860S7	19,625	150	148,95	0,0070	1402,27	27,52
4	Y1860S7	19,625	150	149,02	0,0065	1308,79	25,68

## 6. Анализ на резултатите

В резултат на проведените обектови и лабораторни изпитвания на бетона при различни обекти и различни по интензивност огневи въздействия се установи, че зависимостта между редуцирането на якостта на натиск и температурата не се различава съществено за четирите изследвани случая. Графичните зависимости по вид и стойности в основната си част съвпадат с нормативната зависимост за варовикови добавъчни материали, дадена в [8].

Зависимостта между редуцирането на модула на еластичността и температурата не се различава съществено за четирите изследвани случая. Графичните експериментални зависимости в основната си част съвпадат с нормативната зависимост, дадена в [49]. Трябва обаче да отбележим, че същите съществено се отличават от приетите у нас според [8].

Получената експериментална зависимост между модула на еластичността и якостта на натиск на бетона при ненарушен бетон потвърждават нормативно приетите у нас съотношения. С повишаване на температурата на огневото въздействие кривината на параболичната зависимост обаче се изменя по посока на оста на якостта на натиск. В този си вид тя съществено се отличава от възприетата у нас нормативна зависимост, което трябва да се отчита при оценка на бетони след пожарно въздействие. Тези резултати потвърждават изнесеното в [10].

Експерименталната зависимост между статичния и динамичния модул на еластичността след претърпените пожарни въздействия показва една добра корелация с използваните в световната практика зависимости, посочени в [53 и 54].

Проведеното обектово изследване за установяване на редуцията в напрегателната сила на струните от гредите на обект Г в резултат на реализираното огнево въздействие показва, че редуцията за различните изпитани струни в най-тежко засегнатата греда варира в границите от 5,2 % до 29,6 % в зависимост от разположението на въжето и дебелината на бетоновото покритие.

## 7. Заключение

В резултат на проведените визуални изследвания, петраграфски анализ, обектови и лабораторни изпитвания и направения въз основа на тях анализ, могат да се направят следните основни изводи:

- Въз основа на естествените термоиндикатори на бетона е установена вероятната температура на пожарното въздействие в експерименталните точки от конструкцията.
- Установена е експериментална зависимост за редуцирането на якостта на натиск на бетона във функция на температурата.
- Чрез ултразвукова диагностика и лабораторни изпитвания е установена експериментална зависимости за редуцирането на статичния и динамичния модул на еластичността на бетона във функция на температурата.
- Установена е зависимостта между якостта на натиск на бетона и неговия модул на еластичността в ненарушен бетон и при бетон след температурни въздействия с различна интензивност. Трябва обаче да отбележим, че същите съществено се отличават от приетите у нас според [8].
- Експерименталната зависимост между статичния и динамичния модул на еластичността след претърпените пожарни въздействия показва добра корелация с използваните в световната практика зависимости, посочени в [53 и 54].
- Чрез оригинална методика е установена остатъчната сила на налягане в армировката от гредите на изследвания мост след температурно въздействие. Редуцията на напрегателната сила за различните изпитани струни в най-тежко засегнатата греда на съоръжението е средно 10,6 %, като зависи основно от разположението на струната във въжето и дебелината на бетоновото покритие.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Philleo, R.* Some Physical Properties of Concrete at High Temperatures. *J. Am. Concr. Inst.* 1958, 54, 857–864.
2. *Tovey, A.K. Crook, R.N.* Experience of fires in concrete structures, *Concrete*, Vol. 20, No. 8, August 1986, pp. 19–22.
3. *Tovey, A.K. Crook, R.N.* Experience of fires in concrete structures, *Evaluation and repair of the damage to concrete*, Special Publication SP 92, American Concrete Institute, Detroit, 1986, pp. 1–14.
4. *Andrews-Phaedonos, F.* Investigation, Assessment and Repair of Fire Damaged Pre-Stressed Concrete (PSC) Beams, 23rd Biennial Conference, Concrete Institute of Australia, Adelaide, 2007.
5. *Andrews-Phaedonos, F.* Fire Damaged Reinforced Concrete – Investigation, Assessment and Repair. Technical Note № 102, April 2011.
6. *Ingham, J.P.* Assessment of fire-damaged concrete and masonry structures: The application of petrography. Proceedings of the 11th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials, Porto, Portugal, 5–9 June 2007.
7. *Schneider, U.* Behaviour of concrete under thermal steady state and non-steady state conditions, *Fire and Materials*, 1976, pp. 103–115.
8. BDS EN 1992-1-2:2004/AC:2015 Evrokod 2: Proektirane na betonni i stomanobetonni konstruksii. Chast 1-2: Obshti pravila. Proektirane na konstruksii sreshtu vazdeystvie ot pozhar.
9. *Franssen, J-M.* Plastic analysis of concrete structures subjected to fire. Proceedings of the workshop on Fire design of concrete structures: What now? What next?, Milan, 2004.
10. *Kee, S.H., Kang, J.H., Choi, B.J., Kwon, Candelaria, J.D.* Evaluation of Static and Dynamic Residual Mechanical Properties of Heat-Damaged Concrete for Nuclear Reactor Auxiliary Buildings in Korea Using Elastic Wave Velocity Measurements, *Materials* **2019**, 12, 2695; doi:10.3390/ma12172695.
11. *Srinivasan, P., Cinitha, A., Mohan, V., Iyer, N.R.* Evaluation of fire-damaged concrete structures with a case study, National Conference on Fire Research and Engineering FiRE 2014-029 IIT Roorkee, Uttarakhand, March 01-02, 2014.
12. *Bazant, Z.P., Kaplan, M.* Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models, Longman Group, Harlow, 1996.
13. *Michael, Y.L.* Chew The assessment of fire damaged concrete. *Building and Environment* Volume 28, Issue 1, January 1993, Pages 97-1.
14. *Knyziak, P., Kowalski, R., Krentowski, J.R.* Fire damage of RC slab structure of a shopping center. *Engineering Failure Analysis* Volume 97, March 2019, Pages 53- 60.
15. *Park, S.J., Yim, H.J.* Evaluation of residual mechanical properties of concrete after exposure to high temperatures using impact resonance method *Construction and Building Materials*, Volume 129, 30 December 2016, Pages 89-97.
16. *Ma, Q., Guo, R., Zhao, Z., Lin, Z. He, K.* Mechanical properties of concrete at high temperature-A review, *Construction and Building Materials* Volume 93, 15 September 2015, Pages 371-383.

17. Federation International du Beton, Fire design of concrete structures – materials, structures and modelling, State-of-art report, Bulletin 38, fib, Lausanne, Switzerland, 2007.
18. *Ingham, J.P., Tarada, F.* Turning up the heat – full service fire safety engineering for concrete structures. *Concrete*, Vol. 41, No. 9, October 2007, pp. 27–30.
19. *Chana, P., Price, B.* The Cardington fire test, *Concrete*, Vol. 37, No. 1, January 2003, pp. 28, 30–31.
20. *Stevens, R.F.* Contribution to discussion on: Steel reinforcement, by R I Lancaster, *The Structural Concrete*, Vol. 3, No. 4, July/August 1966, pp. 184–185.
21. *Holmes, M., Anchor, D., Cook, G.M.E., Crook, R.N.* The effects of elevated temperature on the strength properties of reinforcing and prestressing steels, *The Structural Engineer*, Vol. 60B, No. 1, March 1982, pp. 7–13.
22. *Holmes, M, Anchor, RD, Cook, GME and Crook, RN.* The effects of elevated temperature on the strength properties of reinforcing and prestressing steels, *The Structural Engineer*, Vol. 60B, No. 1, March 1982, pp. 7–13.
23. *Kretz, J.* Leistungsbeschreibung mit Validierungs- und Anwendungsbeispielen des Bau Statik-Moduls S853.de Stahlbeton-Querschnitte, Analyse im Brandfall, Bauteilanalyse im Brandfall nach EC 2 Teil 1-2 und Nationalem Anhang, 2015, s. 34–40.
24. *Unterbuchberger, C., Müller, A.* Toleranzen und Vorhaltemaß der Betondeckung beim Nachweis der Feuerwiderstandsdauer im Massivbau. In: *Beton und Stahlbetonbau*, Heft 10, Oktober 2015. Ernst & Sohn.
25. *Liu, X. Yu, C. Quan, W. Chen, L.* Inspection, materials testing and field testing of a prestressed concrete box bridge after fire exposure, *Fire Safety Journal* Volume 108, September 2019, 102852.
26. *Rujin, M. Chuanjie, C. Minglei, M. Airong, C.* Performance-based design of bridge structures under vehicle-induced fire accidents: Basic framework and a case study, *Engineering Structures*, Volume 197, 15 October 2019, 109390.
27. *Nazar, K. Ali. Oukaili, Allawi, A.A.M. Albayati, A.* Rehabilitation of Mohammed Al-Qassim Bridge after Fire Attack Using CFRP Sheets: A Case Study, SMAR-2019, Conference Paper, August 2019.
28. *Fletcher, I. A., Welch, S., Torero, J. L., Carvel, R. O., Usmani, A.* Behaviour of concrete structures in fire. *Thermal science*, 11: 37-52, 2007.
29. *Kodur, V., Bisby, L. A.* Evaluation of fire endurance of concrete slabs reinforced with fiber-reinforced polymer bars. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131: 34–43.
30. *Wheatley, R. Gibbin, N., de Melo, M. Gonzalez-Quesada, M. Harwood, K.* Assessment and repair of a fire-damaged prestressed concrete bridge, *Forensic Engineering: Informing the Future with Lessons from the Past* ISBN 978-0-7277-5822-4, ICE Publishing: All rights reserved doi:10.1680/feng.58224.115.
31. *Felicetti, R.* The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, Issue 4, 2006, pp. 321–329.
32. *JaeYim, H. Park, S-J. Jun, Y.* Physicochemical and mechanical changes of thermally damaged cement pastes and concrete for re-curing conditions, *Cement and Concrete Research* Volume 125, November 2019, 10583.

33. Dolinar, U., Trtnik, G., Turk, G., Hozjan, T. The feasibility of estimation of mechanical properties of limestone concrete after fire using nondestructive methods, *Construction and Building Materials*, Volume 228, 20 December 2019, 116786.
34. Li, L., Jia, P., Dong, J., Shi, L., Zhang, G., Wang, Q. Effects of cement dosage and cooling regimes on the compressive strength of concrete after post-fire-curing from 800 °C, *Construction and Building Materials* Volume 142, 1 July 2017, Pages 208–220.
35. Han, Y., Xie, Y., Wang, W., Jiang, R., Yin, K. Determining the fire-damage temperature of concrete by inclusion decrepitation *Fire Safety Journal*, Volume 47, January 2012, Pages 40–45.
36. Cao, M., Ming, X., Yin, H., Li, L. Influence of high temperature on strength, ultrasonic velocity and mass loss of calcium carbonate whisker reinforced cement paste, *Composites Part B: Engineering*, Volume 163, 15 April 2019, Pages 438–446.
37. Georgali, B., Tsakiridis, P.E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study, *Cement and Concrete Composites*, Volume 27, Issue 2, February 2005, Pages 255–259.
38. Short, N.R., Purkiss, J.A., Guise, S.E. Assessment of fire damaged concrete using colour image analysis, *Construction and Building Materials*, Volume 15, Issue 1, February 2001, Pages 9–15.
39. BDS EN 12390-7:2009 „Izpitvane na vtvarden beton. Chast 7: Platnost na vtvarden beton“.
40. BDS EN 12504-1:2009 „Izpitvane na beton v konstruktsii. Chast 1: Yadki. Izryazvane, proverka i izpitvane na natisk“.
41. BDS EN 12390-3:2009 „Izpitvane na vtvarden beton. Chast 3: Yakost na natisk na probni tela“.
42. BDS EN 12504-2:2012 „Izpitvane na beton v konstruktsii. Chast 2: Izpitvane bez razrushavane. Opredeleyane na goleminata na otskoka“.
43. BDS EN 14630:2007 „Produkti i sistemi za predpazvane i vazstanovyavane na betonni konstruktsii. Metodi za izpitvane. Opredeleyane na dalbochinata na karbonizatsiya na vtvarden beton chrez fenolftaleinov metod“.
44. BDS EN 12504-4:2005 „Izpitvane na beton v konstruktsii. Chast 4: Opredeleyane na skorostta na razprostranenie na ultrazvukov impuls“ BS 1881 Part 203:1986 „Testing concrete. Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete“.
45. BS 8110 Part 2 Structural use of concrete – Part 2 Code of practice.
46. BDS EN ISO 15630-1 „Stomana za armirane i predvaritelno napryagane na beton. Metodi za izpitvane. Chast 1: Prati, goreshovaltsuvan tel i izteglen tel za armirane“.
47. BDS EN ISO 6892-1:2016 „Metalni materiali. Izpitvane na opan. Chast 1: Metod za izpitvane pri stayna temperatura“.
48. BDS EN 10080:2005 „Stomani za armirane na stomanobetonni konstruktsii. Zavaryaema armirovachna stomana. Obshti polozheniya“.
49. ACI 216 Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies.
50. ACI Committee 363. State-of-the-art report on high-strength concrete. *ACI J. Proc.* 1984, 81, 364–411.
51. ACI Committee 318. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary; American.

52. *Noguchi, T., Tomosawa, F., Nemati, K.M., Chiaia, B.M., Fantilli, A.P.* A practical equation for elastic modulus of concrete. *ACI Mater. J.* 2009, 106, 690–696.

53. *Lydon, F.D. Balendran, R.V.* Some observations on elastic properties of plain concrete. *Cem. Concr. Res.* 1986, 16, 314–324, [CrossRef].

54. *Popovics, J.S., Song, W., Achenbach, J.D., Lee, J.H., Andre, R.F.* One-sided stress wave velocity measurement in concrete. *J. Eng. Mech.* 1998, 124, 1346–1353 [CrossRef].

## **EXPLOITATION PROBLEMS OF BEARING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AFTER FIRE**

**B. Petrov<sup>1</sup>, I. Doykov<sup>2</sup>, S. Boyadjiev<sup>3</sup>**

*Keywords: fire impact, thermal indicators, reinforced concrete*

### **ABSTRACT**

The amount of damage after a fire depends mainly on the intensity of the fire. Long periods of temperature exposure cause changes in the physicochemical properties of concrete, followed by a reduction in mechanical properties.

Structures differing in purpose, class of concrete in terms of compressive strength, thickness of the concrete coating, maximum temperature in the focus of the fire and duration of the fire impact are analyzed. The methods for evaluating structures after fire are presented.

The present study presents the change in the strength and deformation properties of concrete after fire impacts of different intensity and duration. Based on the natural heat indicators of the concrete, the probable fire temperature has been established. An experimental dependence is established for the variation of the compressive strength of concrete as a function of temperature. The change in the modulus of elasticity of the concrete is determined by means of ultrasonic diagnostics.

---

<sup>1</sup> Bogomil Petrov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: [bwp\\_fce@uacg.bg](mailto:bwp_fce@uacg.bg)

<sup>2</sup> Ivan Doykov, Assoc. prof. Dr. Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: [idoikov\\_fce@uacg.bg](mailto:idoikov_fce@uacg.bg)

<sup>3</sup> Simeon Boyadjiev, Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: [sboyadjiev\\_fce@uacg.bg](mailto:sboyadjiev_fce@uacg.bg)