

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО-ИЗЧИСЛИТЕЛЕН МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ВЪЗРАСТТА НА БЕТОНА В СТРОИТЕЛНИ КОНСТРУКЦИИ**

**Иван Ростовски<sup>1</sup>, Валерий Найденов<sup>2</sup>**

## **EXPERIMENTAL-NUMERICAL METHOD FOR DETERMINATION OF CONCRETE AGE IN STRUCTURES**

**Ivan Rostovsky, Valeriy Naidenov**

### **Abstract:**

*It is well known that the concrete characteristics change over time. The kinetics of these changes is influenced by various factors – concrete composition and properties of concrete, exposure conditions, stress state, etc. Sometimes in construction practice it is necessary to estimate the approximate age of concrete in different types of existing structures and elements. The report discusses an experimental-computational method for determining the age of concrete aged in different conditions, based on known relationships between the depth of carbonation and the age of the concrete. Thus, if the depth of carbonation of the concrete is known, the duration of action of the carbonation process, respectively the age of the concrete, can be calculated. The proposed method has been successfully approved by the authors when preparing numerous technical expert reports concerning existing buildings and facilities.*

### **Keywords:**

*Concrete, Depth of carbonation, Concrete age, Diffusion*

### **1. ВЪВЕДЕНИЕ**

Както е дефинирано в основният стандарт БДС EN 206:2013 + A2:2021 [1], бетонът е материал, получен чрез смесване на цимент, едър и дребен добавъчен материал и вода, с или без химични добавки, минерални добавки или влакна, който започва да проявява свойствата си в процеса на хидратация. Към настоящия, бетонът е най-често използваният материал по принцип, ако изключим водата.

Често пъти в строителната практика възниква необходимостта от приблизително определяне на възрастта на бетони, изпълнени и експлоатирани в различни

---

<sup>1</sup> Иван Ростовски, проф./д-р, катедра „Строителни материали и изолации“, Строителен факултет, Университет по Архитектура, Строителство и Геодезия, София, бул. „Христо Смирненски“ №1, [rostovsky\\_fce@uacg.bg](mailto:rostovsky_fce@uacg.bg); Ivan Rostovsky, prof./PhD, Department of building materials and insulations, Faculty of Construction engineering, University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Sofia, 1 Hristo Smirnenski blv., [rostovsky\\_fce@uacg.bg](mailto:rostovsky_fce@uacg.bg).

<sup>2</sup> Валерий Найденов, доц./д-р, направление „Физико-химична механика“, Институт по Механика - БАН, София, ул. „акад. Г. Бончев“, блок 4, [valna53@mail.bg](mailto:valna53@mail.bg); Valeriy Naidenov, Assoc. prof./PhD, Department of physical and chemical mechanics, Institute of Mechanics – BAS, Sofia, acad. G. Bonchev str, [valna53@mail.bg](mailto:valna53@mail.bg)

експлоатационни условия, най-вече бетони в съществуващи бетонни и стоманобетонни конструкции и отделни техни елементи.

Към момента няма стандартизиран или общоприет метод за определяне възрастта на бетона. Методите, които се прилагат за датирание в археологията, като радиоизотопно датирание, базирано на намаляването на съдържанието на изотопа въглерод 14 не осигурява необходимата точност и се използва главно за материали с биологичен произход. Недостатъчна точност се наблюдава и при метода за определяне на възраст на бетона чрез безразрушително измерване на кинетиката на електрическото съпротивление в бетонното сечение във функция на времето [2]. Казаното по-горе прави цитираните методи негодни за практически цели, свързани с определяне на възраст на бетона.

В настоящия случай е използвана позната и надеждна зависимост между дълбочината на карбонизация на бетона и неговата възраст.

### 1.1. Карбонизация на бетона и значението ѝ за дълготрайността на конструкциите

Карбонизацията на бетона е относително бавен процес, който се дължи на взаимодействие на продуктите на хидратация на цимента, най-вече свободен калциев хидрооксид  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (портландит) и въглеродния диоксид  $\text{CO}_2$  от атмосферата. Карбонизацията протича през целия експлоатационен период на бетонните и стоманобетонни конструкции, като постепенно забавя своя темп поради затруднения достъп на  $\text{CO}_2$  в дълбочина на бетонното сечение.

Съществено е значението на карбонизацията за армировъчната стомана. Доказано е, че при наличие на кислород армировъчната стомана в бетона започва да кородира при водороден показател (рН) на средата под 11,8. В не увреден бетон стойността на водородния показател е висока над 12,0÷12,5, т.е. средата е силно алкална. В подобна среда настъпва т. нар. пасивиране на стоманата, при което не протичат процеси на корозия.

За да може бетонът да осъществява трайно защитно действие по отношение на армировката, е необходимо той и течната фаза в него да имат висок водороден показател – да бъдат алкални. Тази висока стойност на водородният показател на бетона се поддържа от наличието на значително количество, (12÷18) % от масата на хидратните продукти, на калциев хидроксид  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , наречен още портландит или свободна (гасена) вар. Взаимодействайки, обаче с някои компоненти от околната среда (киселини, водни разтвори на кисели соли), свободната вар формира соли – хлориди, сулфати, нитрати и др., които са неутрални или по-слабо алкални, в резултат на което водородният показател на течната фаза на бетона се понижава, т.е. настъпва намаляване на алкалността (неутрализиране) на бетона, с което се създават условия за корозия на армировката. При нормална експлоатация и отсъствие на агресивни среди, калциевият хидроксид взаимодейства с въглеродния диоксид от въздуха, процес известен още под името карбонизация на бетона, при това рН на средата се понижава до 9.

### 1.2. Химия на карбонизацията

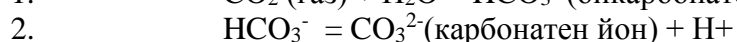
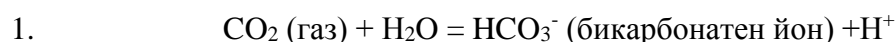
Карбонизацията се дължи на факта, че в присъствие на карбонатни йони в поровия разтвор на втвърдените циментови пасти и бетона, калциевите йони взаимодействат с тях и формират утайка от калциев карбонат ( $\text{CaCO}_3$ ). Калциевият карбонат има незначителна разтворимост във вода. Теоретично, при бетона карбонизацията води до разлагане на всички калциеви съединения и формиране на калциев карбонат.

Въглеродният диоксид, намиращ се в атмосферата, не може да взаимодейства директно с циментовата паста. Първоначално той трябва да се разтвори във вода и да формира карбонатни йони, които на свой ред да реагират с калциевите йони от поровия разтвор. Типът на карбонатните йони зависи от водородния показател на средата. Когато въглеродният диоксид  $\text{CO}_2$  влезе в контакт с неутрални води (рН = 7), например дъждовна

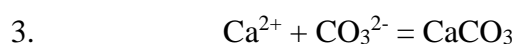
вода, той образува бикарбонат. Във вътрешността на бетона, стойността на рН е висока (12-13) и в резултат на това бикарбоната дисоциира и образува карбонатни йони.

Вследствие на взаимодействието на циментовата паста и въглеродния диоксид се образува карбонатен слой, външната част на който е богата на бикарбонатни йони, а вътрешната, в близост до циментовите частици (с висока стойност на рН) се състои от кристали на калциев карбонат. Калциевия карбонат съществува в три кристалографски форми – арагонит, ватерит и калцит. Калцитът и ватеритът се срещат в карбонизирания бетон, като с течение на времето метастабилният ватерит преминава в калцит.

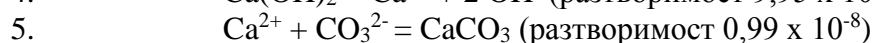
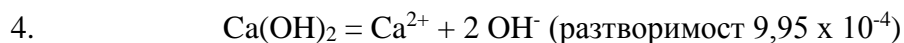
Процесът на карбонизация може да се опише със следните химични уравнения:



Карбонатният йон реагира с калциевите йони в поровия разтвор:



Това води до понижаване на концентрацията на калциеви йони, което на свой ред предизвиква разтваряне на допълнителни количества калциев хидроксид (портландит), а в след изчерпването на портландита и на калциевите хидросиликати (C-S-H), хидроалуминати и еtringита.



При рН = 9,2 – 9,4 (когато фенолфталейнът променя своя цвят), нито една от калциевите фази в циментовата паста не запазва свой първоначален вид.

## 2. КИНЕТИКА НА КАРБЕНИЗАЦИОННИЯ ПРОЦЕС

### 2.1 Механизъм на карбонизацията

Механизмът на химичните реакции и важен и от него зависят структурните промени на карбонатната обвивка на бетона. Той се определя от съотношението на различните фази в циментовата паста, вида на цимента, грижите за бетона в ранна възраст и водо-циментното отношение. Хидравличните добавки в бетона намаляват относителния дял на портландита за сметка на калциевите хидросиликати и хидроалуминати.

Интензивността на процеса зависи от наличието на водна фаза и от скоростта на дифузия. Дифузията се контролира от разликата в концентрациите на различните йони – калциеви и карбонатни. Дифузията на газове, в случая  $\text{CO}_2$ , е много по-бърза от дифузията на калциевите йони. Следователно скоростта на карбонизация ще се определя основно от влажността на бетона т.е. от степента на запълване с вода на порьозната структура на бетона. При сух бетон, въглеродният диоксид може да проникне дълбоко в обема на бетона, но няма достатъчно вода за протичане на карбонизационния процес. При водонаситения бетон, само карбонатните йони могат да се движат и карбонизацията е много бавна. С други думи, оптимални условия за протичане на карбонизация са налице при проницаема структура на бетона, с голям обем на общата и открита порьозност т.е. при по-високо водо-циментно отношение.

### 2.2 Скорост на карбонизацията

Карбонизацията на бетона протича когато са налице въглероден диоксид и вода, а скоростта и се определя от бързината на придвижване на карбонатните йони в

циментовата паста. Дифузията по същество е масов пренос, по направление на градиента на концентрацията. Стационарната дифузия следва първия закон на Фик:

$$J = D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (1)$$

където  $J$  е количеството на компонента, който се пренася – в случая  $\text{CO}_2$  и карбонатни йони, през единица площ.  $\frac{\partial c}{\partial x}$  е градиента на моларната концентрация.  $D$  е коефициент на дифузия, който се определя от проницаемостта на материала – от вида и обема на порьозната структура на бетона.

От втория закон на Фик може да се установи дълбочината на карбонизация при стационарен режим:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

На практика не е възможно да се получи подробен израз за скоростта и дълбочината на карбонизация, който да отчете всички възможни фактори – влажност на бетона, температура, съдържание и вид на цимента, порьозна структура и плътност на бетона, парциално налагане на  $\text{CO}_2$ , наличие на пукнатини.

*FIB bulletin 34* [3] и *FIB bulletin 59* [4] предлагат най-пълния параметричен модел за определяне на дълбочината на карбонизация  $x_c(t)$ , който има вида:

$$x_c(t) = \sqrt{2k_e k_c (k_t R_{ACC,O}^{-1} + \varepsilon_t) c_s \sqrt{t} \cdot W(t), m} \quad (3)$$

където

$k_e$  - функция на околната среда;

$k_c$  - трансферен параметър;

$k_t$  - регресионен параметър (от изпитване);

$R_{ACC,O}^{-1}$  - обратно ефективно съпротивление на карбонизация,  $[(\text{mm}^2/\text{year})/(\text{kg}/\text{m}^3)]$ ;

$\varepsilon_t$  - грешка,  $[(\text{mm}^2/\text{year})/(\text{kg}/\text{m}^3)]$ ;

$C_s$  - концентрация на  $\text{CO}_2$  в средата,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$W(t)$  - функция на времето (метеорологично);

$t$  - време, години.

За всеки тип бетон при дадена експлоатационна среда дълбочината на карбонизация за инженерни цели може да се изчисли, съгласно израза:

$$d_c = k\sqrt{t}, mm \quad (4)$$

$d_c$  – дълбочина на карбонизация, mm;

$k$  – коефициент, зависещ от структурата на бетона и условията на средата;

$t$  – възраст на бетона, години.

В БДС EN 16757:2022 [5] е направено прецизиране на стойността на коефициента  $k$ , в зависимост от условията на работа и якостта на бетона.

При открита повърхност на бетона и употреба на чист клинкерен цимент СЕМ I, в зависимост от условията на работа за дълбочина на карбонизация може да се приемат следните ориентировъчни стойности (виж таблица 1).

По този начин, ако се знае или измери дълбочината на карбонизация на бетона, като се вземат под внимание условията на експлоатация респ.  $k$ , лесно може да се изчисли

продължителността на действие на процеса на карбонизация – съответно възрастта на бетона, разбира се като функция на условията на отлежаване и въздействието на спецификата на околната среда.

Таблица 1.  $k$ -коефициент [mm/година<sup>0,5</sup>] за изчисляване на карбонизацията за различни класове по якост на бетон (цилиндри) и условия на въздействие на околната среда и степен на карбонизация за различни условия на въздействие на околната среда (източник БДС EN 16757).

Клас по якост на бетона	< 16 МПа	16 до 20 МПа	25 до 35 МПа	> 35 МПа
Параметри	Стойност на $k$ -коефициента в mm/година <sup>0,5</sup>			
Строителни съоръжения				
Изложени на дъжд		2,7	1,6	1,1
Защитени от дъжд		6,6	4,4	2,7
В земята а		1,1	0,8	0,5
Сгради				
Отвън				
Изложени на дъжд	5,5	2,7	1,6	1,1
Защитени от дъжд	11	6,6	4,4	2,7
Отвътре при сух климат с	11,6	6,9	4,6	2,7
С покритие b	16,5	9,9	6,6	3,8
Без		1,1	0,8	0,5
В земята а				
a	Под нивото на подпочвените води $k = 0,2$ .			
b	Боя или тапет. (Под плочки, паркет и ламинат $k$ е прието да бъде 0).			
c	Отвътре при сух климат означава, че относителната влажност (RH) обикновено е 45 % и 65 %.			

Описаният по-горе експериментално-изчислителен метод е апробиран успешно на редица строителни обекта, когато е възниквала необходимост от определяне на приблизителната възраст на бетона, в това число при арбитражни оценки.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО-ИЗЧИСЛИТЕЛЕН МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ ВЪЗРАСТТА НА БЕТОНА

Методът обхваща четири етапа, в следната последователност:

- вземане на проби от бетона - изрязване на сондажни ядки от конструкцията;
- определяне на дълбочината на карбонизация, на място, след изрязването на ядките;
- изготвяне и изпитване на цилиндрични пробни тела от ядките – за определяне на якостта на натиск на бетона на място (in situ);
- изчисляване на приблизителната възраст на бетона.

#### 3.1. Вземане на проби от бетона

Тъй като пробовземането се извършва от вече изградени конструкции, същото се извършва чрез изрязване на сондажни ядки (фигура 1а и 1б). Сондажните ядки се изрязват от конструкцията с помощта на сондажна машина. Сондирането се извършва перпендикулярно на повърхността на бетона, така че да не се получи повреждане на ядките. Спазват се предписанията на БДС EN 12504-1[6].

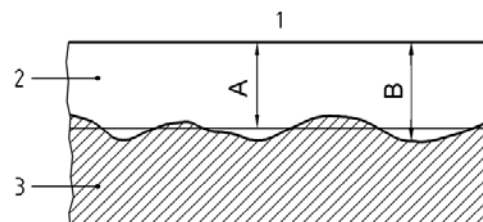


Фигура 1а и 1б Изрязване на сондажни ядки от конструкциите за определяне на възрастта на бетона

Желателно е изрязаните пробни тела да не съдържат армировка, по изключение се допуска в едно пробно тяло да се съдържа един армировъчен прът, с направление перпендикулярно на оста на ядката, като това се отбелязва при изпитване.

### 3.2. Определяне на дълбочината на карбонизация

Дълбочината на карбонизация се измерва на място, непосредствено след изрязването на ядките. За целта се използва стандартизирания колориметричен (фенолфталеинов) метод, описан в БДС EN 14630 [7]. Повърхността на ядките се третира с достатъчно количество фенолфталеинов индикаторен разтвор, така че повърхността да е влажна, без теч по нея. Дълбочината на карбонизация във всяка дадена точка е разстоянието (измерено в mm) от външната повърхност на бетона до ръба на червено-лилаво оцветената област. Тъй като на практика фронтът на карбонизация е с неправилни очертания, трябва да се измерят двете величини – средна  $d_{k,mean}$  и максимална  $d_{k,max}$  дълбочина с точност до mm (фигура 2).



Фигура 2а и 2б Измерване на дълбочината на карбонизация на бетона, Легенда  
1- външна повърхност; 2 - без промяна на цвета (с карбонизация); 3 - червено-лилав цвят (без карбонизация); А -  $d_{k,mean}$ ; В -  $d_{k,max}$

При изолирани джобове, например при пукнатини, при които максималната дълбочина  $d_{k,max}$  е значително по-голяма от средната стойност  $d_{k,mean}$  (фигура 2), тогава стойността  $d_{k,max}$  не трябва да се използва при изчисляването на  $d_{k,mean}$ . Поправената средна стойност  $d_{k,mean}$  и максималната дълбочина или дълбочини  $d_{k,max(1...n)}$  трябва да се записват с точност до най-близкия mm, за предпочитане на чертеж или снимка.

### 3.3. Определяне на якостта на натиск на бетона на място(in situ)

Сондажните ядки се нарязват с режещ диск, до получаване на проби с цилиндрична форма. Посоката на рязане е успоредна на оста на ядката. Изрязаните цилиндрични

пробни тела се претеглят с точност 1 g и се измерват геометричните им характеристики, като получените маси служат за определяне на обемната плътност на бетона и установяване на нееднородност и наличие на неуплътнени зони в бетона.

Предвидените за натоварване повърхности се обработват чрез шлифване или чрез покриване (подливане). Якостта на натиск се изчислява по формулата:

$$f_c = \frac{F}{A_c}, \quad (5)$$

където:

$f_c$  е якостта на натиск, в МПа (N/mm<sup>2</sup>);

$F$  е максималното натоварване при разрушаването, в N;

$A_c$  е площта на напречното сечение на пробното тяло, върху която действа силата на натиск, в mm<sup>2</sup>.

Якостта на натиск се изразява с точност 0,1 МПа (N/mm<sup>2</sup>).

### 3.4. Изчисляване на приблизителната възраст на бетона

Изчислението се извършва, като се използва формула (4), откъдето за  $t$  се получава:

$$t = \left( \frac{d_c}{k} \right)^2 \quad (6)$$

Тук трябва да се вземе под внимание обстоятелството, че якостта на бетона може да нараства в продължение на години, ако се осигурят благоприятни условия на втвърдяване – влажна среда и положителна температура.

Най-интензивно нараства якостта на бетона през първите няколко дни на втвърдяване. На третия ден от втвърдяването якостта е в рамките на 30-50% от стандартната якост на бетона (на 28 ден), а на седмия ден – 60-70%. При възраст 90 дни якостта е с около 25-30% по-висока от тази на 28-ден.

Европейския комитет по бетона (СЕВ) предлага следната зависимост за определяне на якостта на бетона на различна възраст, при положение, че е известна якостта му на 28-ден [8]:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm} \quad (7)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (8)$$

където:

$f_{cm}(t)$  е средната якост на натиск на бетон на възраст от  $t$  дни;

$f_{cm}$  е средната якост на натиск на бетона на възраст 28 дни;

$\beta_{cc}(t)$  е коефициент, който зависи от възрастта на бетона  $t$ ;

$t$  е възрастта на бетона в дни;

$s$  е коефициент, който зависи от типа на цимента:

= 0,20 за цимент с клас по якост на натиск СЕМ 42,5 R, СЕМ 52,5 N и СЕМ 52,5 R

= 0,25 за цимент клас СЕМ 32,5 R и СЕМ 42,5 N;

= 0,38 за цимент клас СЕМ 32,5 N;

В следващите редове е представен числен пример за онагледяване на метода, експериментални резултати от съществуващо стоманобетонни конструкции. По отношение на обемната плътност може да се каже че получените стойности имат само

информационен характер – дават само косвена информация за степента на уплътняване на бетона в отделната зона. Видно е, че всички единични резултати попадат в рамките на изискванията за „обикновен бетон“ – 2000 до 2600 kg/m<sup>3</sup>.

Табл. 2 Характеристики на изследвания бетон

Проба №	Обемна плътност, kg/m <sup>3</sup>	Якост на натиск, МПа	Дълбочина на карбонизация, mm
1	2385	28,7	34
2	2337	29,1	36
3	2342	30,0	34
4	2298	26,8	35

Определените единични, респ. средна, стойности за якостта на натиск показват, че вероятният клас по якост на натиск на бетона е по време на изпълнението е бил в рамките на С16/20 (според изискванията на БДС EN 206:2013 + А2:2021).

Средната стойност на дълбочината на карбонизация е определена на 34,8±1,0 mm.

Преди изчислителната процедура да започне, трябва да се оценят условията на отлежаване на бетона в изследваната конструкция. В случая тя е била защитена с повърхностна рулонна хидроизолация.

Това са и входните данни за определяне възрастта на бетона, според визираната по-горе стандартна методика, основана на Табл. G.1 от БДС EN 16757:2022.

От Табл. 1, за бетон с клас по якост на натиск С16/20 в жилищни сгради и защитен по време на отлежаването, стойността на к-коэффициента (mm/година<sup>0,5</sup>) за изчисляване на карбонизацията за различни класове по якост на бетон (цилиндри) за различни условия на въздействие на околната среда може да бъде приет за равен на 6,6.

В такъв случай, използвайки от спомената по-горе формула може да се изчисли възрастта на бетона, както следва:

$$34,8 = 6,6\sqrt{t}, \text{ респ. } \sqrt{t} = 34,8 : 6,6 = 5,272$$

Следователно, възрастта на изследваните бетони се определя като  $t = 27,77$  години.

Отчитайки това, че математическата неопределеност на средната стойност на измерената дълбочина на карбонизация е 34,8±1,0 mm (вж. Табл. 2), резонно е да се определи възрастта на бетона за двете граници - 35,8 и 33,8 mm:

- за 33,8 mm изчислената възраст  $t = 29$  години;
- за 35,8 mm изчислената възраст  $t = 26$  години.

Следва да се има предвид, че използваните в изчислителните процедури стойности на измерените показатели на изследвания бетон (якост на натиск и дълбочина на карбонизация) са статистически величини, чиято достоверност е свързана с броя на изследваните пробни тела.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаният експериментално-изчислителен метод за определяне на приблизителната възраст на бетона в строителни конструкции е основан на резултатите, получени при изпитване на бетон от конструкции или готови елементи, по действащи национални (и европейски) стандарти. Това означава, че същите са валидирани и верифицирани, с необходимата степен на проследимост и повтаряемост. Същото се отнася и до изчислителната процедури.



В резултат на всичко казано по-горе, предложеният метод може да се определи като ясно формулиран, с висока степен на надеждност. Методът успешно е апробиран от авторите при изготвяне на множество технически експертизи на съществуващи сгради и съоръжения, където поставената задача и била определяне възрастта на използваните бетони.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] БДС EN 206:2013+A2:2021 Бетон. Спецификация, свойства, производство и съответствие;
- [2] Lu Xiaochan, E. Tong, X. Zha, L. Chang, Equivalent method for obtaining concrete age on the basis of electrical resistivity, Scientific reports 11, Article No 21720, 2021, ([www.nature/scientific-reports](http://www.nature/scientific-reports));
- [3] FIB Bulletin 34, Model Code for Service Life Design. Model Code , 116 pages, ISBN 978-2-88394-074-1, February 2006;
- [4] FIB Bulletin 59, Condition control and assessment of reinforced concrete structures exposed to corrosive environments (carbonation/chlorides). State-of-art report (80 pages, ISBN 978-2-88394-099-4, May 2011)
- [5] БДС EN 16757:2022 Устойчиво строителство. Декларации за продукт по отношение на околната среда. Правила за категория на продуктите бетон и бетонни елементи.
- [6] БДС EN 12504-1:2019 Изпитване на бетон в конструкции. Част 1: Ядки. Изрязване, проверка и изпитване на натиск
- [7] БДС EN 14630:2007 Продукти и системи за предпазване и възстановяване на бетонни конструкции. Методи за изпитване. Определяне на дълбочината на карбонизация на втвърден бетон чрез фенолфталеинов метод
- [8] БДС EN 1992-1-1:2005 Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради.