



Получена: 31.12.2022 г.

Приета: 13.02.2023 г.

ИЗМЕНЕНИЕ НА ЯКОСТТА И ДЪЛБОЧИНАТА НА КАРБОНИЗАЦИЯ НА БЕТОНИ, СЪДЪРЖАЩИ РЕЦИКЛИРАНИ ДОБАВЪЧНИ МАТЕРИАЛИ ОТ СТРОИТЕЛНА КЕРАМИКА

Б. Петров¹

Ключови думи: бетон, карбонизация, рециклирана керамика

РЕЗЮМЕ

Бетоните, съдържащи керамични рециклирани добавъчни материали (КРДМ), се характеризират с по-малка плътност и по-голяма пропускливост от бетоните с конвенционални добавъчни материали. Изследвани са изменението на якостта и дълбочината на карбонизацията в продължение на 5 години на бетони с различно съдържание на КРДМ (20 %, 60 % и 100 %) и на един контролен бетон с 0 % КРДМ. Направено е сравнение между резултатите, получени в условията на естествена и на ускорена карбонизация в среда с 50 % CO₂. Установено е, че бетоните с по-голямо количество на КРДМ имат по-ниски якости от тези на контролния бетон, но с течение на времето тази разлика намалява – след 6-ия месец при бетона с 20 % КРДМ на практика изчезва, а при бетона със 100 % КРДМ е само 16 %. С нарастване на количеството на КРДМ в бетона дълбочината на карбонизацията се увеличава и при наличие на 60 % и 100 % КРДМ би се наложило да се предприемат мерки за защита от корозия на стоманена армировка, вложена в тези бетони.

1. Въведение

Използването на рециклирани добавъчни материали (РДМ) има голям принос към опазването на околната среда, тъй като най-използваният строителен материал е именно бетонът [1]. Основният обем в бетона е запълнен с добавъчни материали, следователно

¹ Боян Петров, гл. ас. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: bpetrov_fce@uacg.bg

използването на РДМ е благоприятно в две направления – намаляване на добива на естествен ДМ и оползотворяване на строителните отпадъци.

Керамичните РДМ (КРДМ), добивани от рециклиране на строителни отпадъци от тухли и керемиди (т. нар. груба керамика), имат редица особености в сравнение с конвенционалните добавъчни материали: по-голяма порьозност, по-малка плътност. Това позволява да се използват като леки ДМ за направата на олекотени и леки бетони (с обемна плътност под 2000 kg/m^3), но води до по-ниски якости на тези бетони и до по-голямата им пропускливост за газообразни и течни агресивни среди. Установено е обаче, че при съдържание на КРДМ до 20 % тези изменения на свойствата са почти незначителни, но влиянието на КРДМ върху свойствата на съдържащите ги бетони нараства с увеличаване на процента на заместване на конвенционалните ДМ с КРДМ [2, 3].

В настоящото изследване КРДМ се използва само като заместител на едрия естествен добавъчен материал (ЕДМ) в бетона и се очаква КРДМ да имат ролята на инертен пълнител, но с по-ниски механични характеристики от ЕДМ. От гледна точка на възможността за употреба на бетони с КРДМ за направата на строителни конструкции, е важно да се установи как се изменят якостите и дълбочината на карбонизация във времето и дали поведението на бетоните отговаря на прогнозите. Карбонизационните процеси са свързани с взаимодействието на CO_2 и продуктите на хидратация на цимента. Тези процеси имат двойко влияние – позитивно, тъй като продуктите от карбонизацията са с по-голяма плътност и биха довели до повишаване на якостта на циментовия камък, но и негативно, в случай на стоманобетонни конструкции, тъй като карбонизацията предизвиква понижаване на рН на циментовия камък, което влияе отрицателно върху пасивиращата способност на бетона и предпазването на стоманената армировка от корозия. Както е известно, при $\text{pH} < 9,5$ се създават условия за корозия на армировката [4].

2. Методика на изследването

Свойствата на използваните КРДМ са по-подробно представени в предишни публикации [5]. Добавъчните материали, използвани в настоящото изследване, имат следните физични и механични характеристики:

- естествен ЕДМ от находището в кариера „Студена“, фракция 4/11,2 mm, с обемна плътност в свободно насипно състояние 1475 kg/m^3 и плътност на зърната 2700 kg/m^3 , водопопиваемост 0,5 % и дробимост 6,7 %;
- КРДМ от натрошени в роторна трошачка тухли от фабриката в с. Багреници, фракция 4/11,2 mm, обемна плътност в свободно насипно състояние 910 kg/m^3 и плътност на зърната 1700 kg/m^3 , водопопиваемост 18 % и дробимост 17,2 %.

Изготвени са бетони с 20 %, 60 % и 100 % замяна на естествения ЕДМ с КРДМ, както и един контролен бетон само с естествен ЕДМ от трошен камък. Проектирани са, по метода на планирания експеримент, 15 състава с водоциментно отношение (В/Ц) 0,45, 0,5 и 0,55 и количества на цимента 300 kg, 350 kg и 400 kg. Пробните тела са отлежавали под вода до 28-ия ден, след което са поставени във въздушно-суха среда (температура $20 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ и относителна влажност на въздуха $60 \pm 5 \%$). В настоящата публикация са представени само резултатите от $\text{В/Ц} = 0,5$ и количество на цимента от 350 kg. Подробно описание на останалите състави и плана на експеримента са представени в предишна публикация [6].

Изпитванията за якост на натиск са според БДС EN 12390-3 [7], като формата на пробните тела е кубична с ръб 100 mm, а всички резултати са умножени с корекционен коефициент 0,95, за да може да се сравняват с резултати, получени върху стандартни пробни тела (150/150/150 mm). Якостта на натиск е определена на възраст 7 дни, 14 дни, 28 дни, 6 месеца, 1 година и 5 години. Предвидено е да бъде проследена якостта на натиск и след 10 години.

За изследването върху процеса на карбонизация на бетоните с КРДМ и контролния бетон са приложени два типа условия на третиране:

- Естествена карбонизация, при която след 28-дневна възраст пробните тела с размери 100/100/100 mm отлежават във въздушно-суха среда (лабораторни условия) в продължение на 5 години.
- Ускорена карбонизация съгласно БДС EN 12390-12:2020 [8], при която пробни тела на възраст 42 дни (28 дни отлежаване под вода и 14 дни изсушаване) са поставени в камера с 50 % съдържание на CO₂ (фиг. 1). За да може всички повърхности да имат контакт с околната среда и карбонизацията да напредва равномерно от всички страни, пробните тела са разположени върху скара и са на разстояние минимум 5 cm едно от друго.

Определянето на дълбочината на карбонизация е проведено съгласно БДС EN 14630 [9]. Колориметричният метод с фенолфталеин е прост и ефективен и дава възможност да се определи зоната, в която рН на бетона е по-малка от 9. Резултатите са получени като средна стойност от 5 измервания на дълбочината на карбонизация върху повърхности, които се третирани с 0,1 % разтвор на фенолфталеин, непосредствено след разцепване на пробното тяло.

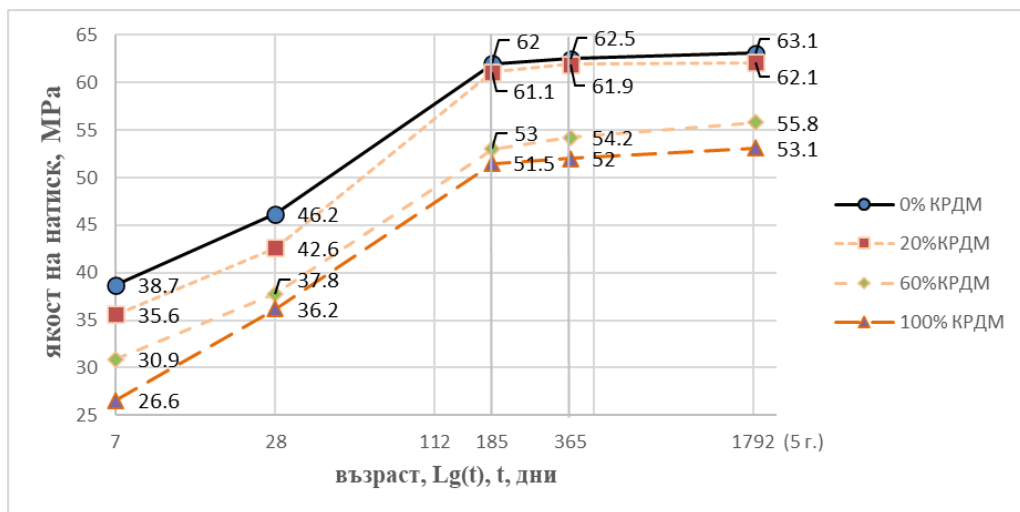


Фиг. 1. Опитна постановка за осъществяване на ускорена карбонизация

3. Анализ на резултатите

3.1. Якост на натиск

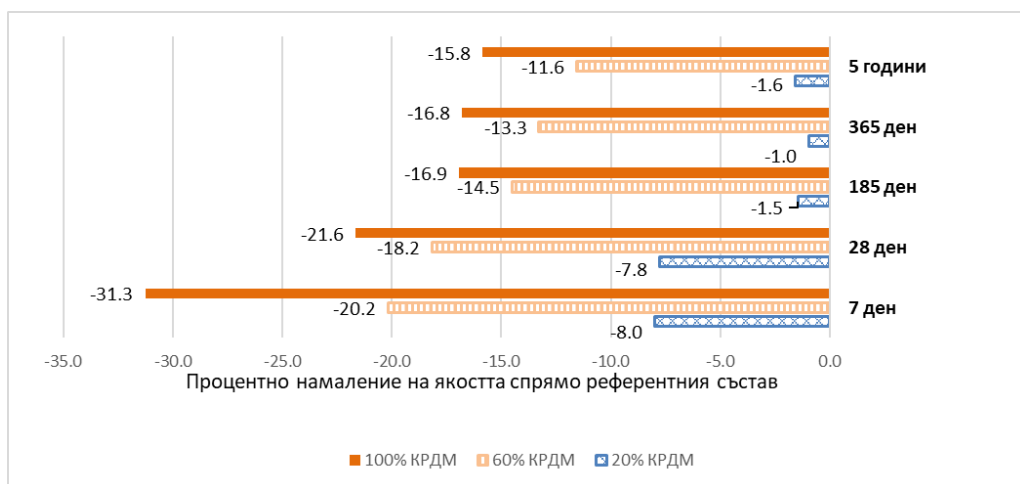
На фиг. 2 е представено влиянието на КРДМ върху якостта на съдържащите ги бетони и развитието на якостта на натиск на бетоните във времето. Очаквано, при всички бетони якостта нараства най-интензивно до 6-месечна възраст (185-ия ден), като след нея нарастването е минимално, на практика пренебрежимо.



Фиг. 2. Кинетика на набирание на якост при бетони с различно съдържание на КРДМ

Разликата в якостта на натиск между бетоните с КРДМ и контролния бетон е най-изразена в ранна възраст – на 7-ия ден достига до 31 % за бетона, при който ЕДМ е изцяло заменен с КРДМ, на 28-ия ден е 22 %, но след 5 години тази разлика е само 16 % – фиг. 3. Този ефект вероятно се дължи на т.нар. „internal curing“, при който порьозните зърна на КРДМ, абсорбирали вода, постепенно я отдават на на циментовия камък и така спомагат за по-добрата му хидратация [10]. Тази разлика би могла да се компенсира с понижаване на В/Ц отношение при бетоните с по-високо съдържание на КРДМ. Това би довело и до по-непроницаема матрица от цименто-пясъчен разтвор около порьозните зърна на КРДМ.

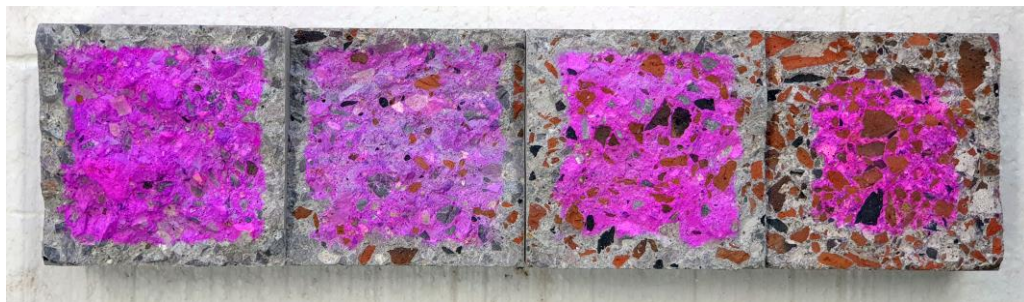
Съставът с 20 % съдържание на КРДМ е с незначително по-малка якост от референтния състав – с около 8 % на 28-дневна възраст и едва 1 % – 2 % на възраст след 6 месеца. Следователно, въвеждането на малки количества КРДМ в бетоните не оказва съществено влияние на якостта на натиск и позволява оползотворяване на значителни количества рециклирана керамика.



Фиг. 3. Процентно намаление на якостта спрямо референтния състав

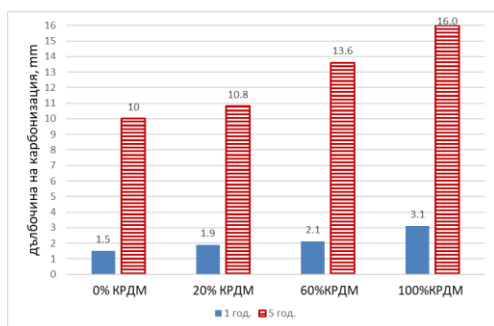
3.2. Дълбочина на карбонизация

По-бързата карбонизация на бетоните с КРДМ в лабораторни условия е илюстрирана на фиг. 4. Установено е, че при състава с 20 % КРДМ дълбочината на карбонизация остава в рамките на стойностите, определени при референтния състав, както след 1 година, така и след 5 години. С увеличаване на съдържанието на КРДМ до 60 % и 100 %, дълбочината на карбонизация нараства съответно с 36 % и 60 % – фиг. 5.

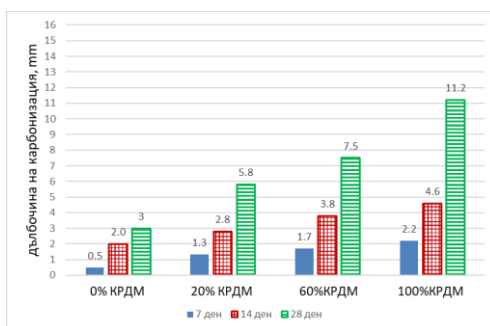


Фиг. 4. Дълбочина на карбонизация при бетони с различно съдържание на КРДМ (0 %, 20 %, 60 % и 100 %), отлежавали в лабораторни условия в продължение на 5 години

Следователно, при използване на значителни количества КРДМ за направата на леки стоманобетонни конструкции, е необходима с около 50 % по-голяма дебелина на бетонното покритие върху стоманената армировка.



Фиг. 5. Нарастване на карбонизацията в зависимост от съдържанието на КРДМ при стандартни условия



Фиг. 6. Нарастване на карбонизацията в зависимост от съдържанието на КРДМ при 50 % съдържание на CO₂

Резултатите от изпитването за дълбочина на карбонизация по ускорения метод са представени на фиг. 6. Ускорената карбонизация позволява да се открият по-добре разликите в поведението на различните видове бетони. Дори съставът с 20 % КРДМ се отличава значително от референтния състав и в зависимост от престоя в камерата, дълбочината на карбонизация е около 2 – 2,5 пъти по-голяма от тази на контролния бетон. Замяната на ЕДМ изцяло с КРДМ води до още по-значително увеличение на дълбочината на карбонизация, която след 28-дневно третиране е 3,7 пъти по-голяма. При бетоните с 60 % КРДМ увеличението е 2,5 пъти. Следователно, според данните от ускорената карбонизация, конструктивните бетони с КРДМ биха изисквали поне 2,5 до 3,5 пъти по-

дебело бетонно покритие или наложили прилагането на специални покрития върху бетонните повърхности или използването на друг тип армировка, например композитна, която не корозира в среда с по-ниска алкалност.

Трудно е да се направи непосредствена връзка между резултатите от ускорената карбонизация и карбонизацията в естествени условия. Предполага се, че 28 дни третиране в камера с 50 % съдържание на CO_2 би било достатъчно, за да се прогнозира карбонизацията в естествена среда с концентрация на CO_2 от порядъка на 0,03 % за целия експлоатационен период на сградата (50 – 100 години) [11]. При бетоните с КРДМ обаче е установено, че това третиране води до по-ниски стойности от 5-годишна експозиция в естествена среда. Вероятната причина е интензивното отделяне на водата в процеса на ускорената карбонизация и частичното колматиране на порите, докато във въздушно суха среда тази вода може да се изпарява от сравнително малките пробни тела и така да се създават максимално благоприятни условия за напредване на фронта на карбонизация. Това би обяснило разликата в абсолютните стойности на дълбочината на карбонизация дори при референтния бетон – 3 пъти по-големи след 5 години естествена карбонизация, в сравнение с 28 дни ускорена карбонизация.

4. Заключение

Заместването на естествения ЕДМ с до 20 % КРДМ не променя значително якостите на натиск, което позволява оползотворяването на КРДМ за направата на олекотени бетони. С увеличаване на съдържанието на КРДМ до 100 % разликата в дългосрочен план е малко над 15 %, което може да бъде компенсирано чрез намаляване на водоциментното отношение.

С нарастване на дела на КРДМ се увеличава и дълбочината на карбонизация, дължаща се на по-голямата порьозност на КРДМ. При използване на 20 %, 60 % и 100 % КРДМ, след 5 години естествена карбонизация, карбонизацията се е повишила съответно с 8 %, 36 % и 60 %, което показва, че при влагане на количества на КРДМ над 20 % е необходимо да се предприемат допълнителни мерки за защита на армировката от корозия, например 1,5 пъти увеличаване на бетонното покритие.

Ускореният метод за определяне на дълбочината на карбонизация, който е приет за прогнозиране на дълговременното поведение на бетона, дава съществени разлики с данните от естествената карбонизация – по-малка абсолютна дълбочина на карбонизация, дори след 28-дневно третиране, но до 3,7 пъти по-големи стойности в сравнение с контролния бетон, като дори замаяната само на 20 % от ЕДМ с КРДМ води до почти двойно увеличение на дълбочината на карбонизация.

Настоящите изследвания потвърждават предишни наблюдения, че при бетоните с КРДМ процесът на карбонизация не следва установените модели за бетоните с конвенционални ДМ [12], които се базират на първия закона на *Fick* за дифузията [11].

Следователно, прилагането на повече от 20 % КРДМ за направата на олекотени и леки бетони трябва да бъде съобразено както с кратковременните характеристики на тези бетони, така и с особеностите на тяхното дълготрайно поведение.

Благодарности

Настоящата публикация отразява научноизследователската работа по проект BG05M2OP001-1.002-0019: „Чисти технологии за устойчива околна среда – води, отпадъци, енергия за кръгова икономика“ за изграждане и развитие на Център за компетентност.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Colin R. Gagg*. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, Volume 40, May 2014, Pages 114-140.
2. *Brito, J., Pereira, A., Correia, J.* Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cem. Concr. Compos.*, 27 (4) (2005), pp. 429-433.
3. *González, J., Gayarre, F., Pérez, C. et al.* Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams, *Construction and Building Materials*, Volume 149, 2017, Pages 507-514, ISSN 0950-0618.
4. *Zhang, D., Shao, Y.* Effect of early carbonation curing on chloride penetration and weathering carbonation in concrete. *Constr. Build. Mater.*, 123 (2016), pp. 516-526.
5. *Petrov, B., Zaharieva, R.* Characteristics of aggregates from recycled construction ceramics for making concrete. VII International scientific conference “Architecture, civil engineering – modernity” 28 – 30 May 2015 Varna, ISSN 2367-7252, pp. 406-413.
6. *Petrov, B., Zaharieva, R.* Study on the influence of different mix design parameters on the compressive strength of concrete containing recycled ceramic aggregate. 15th International scientific conference VSU'2015, ISSN 1314-071X, p. 345-370.
7. БДС EN 12390-3. 1019, Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.
8. БДС EN 12390-12:2020, Testing hardened concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method.
9. БДС EN 14630. 2007, Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.
10. *Arnould, M., Virlogeux, M.* Granulats et bétons légers. EAN13: 9782859780869, 1986.
11. *Levy, C.* La carbonatation accélérée des bétons: comparaison BO/BHP du pont de Joigny, Les bétons à hautes performances. Caractérisation, durabilité, applications, sous la direction de Y. Malier, Presse de l'ENPC, Paris, 1992.
12. *Zaharieva, R., Petrov, B.* Opportunities to use recycled ceramic aggregate for manufacturing of structural concrete: carbonation. International Conference on Civil Engineering Design and Construction (Science and Practice), 15 – 17 September 2016, Varna, Bulgaria, ISBN: 978-954-92866-7-0, pp. 294-299.

STRENGTH DEVELOPMENT AND CARBONATION OF CONCRETE INCLUDING RECYCLED AGGREGATE FROM CONSTRUCTION CERAMICS

B. Petrov¹

Keywords: manuscript, preparation, typeset, format

ABSTRACT

Concretes containing recycled ceramic aggregate (RCA) are characterized by lower density and greater permeability than concretes with conventional admixtures. The change in strength and depth of carbonation over 5 years of concretes with different contents of RCA (20 %, 60 % and 100 %) and of a control concrete with 0 % RCA has been investigated. A comparison is made between the results obtained under the conditions of natural and accelerated carbonation in an environment with 50 % CO². It has been established that the concretes with a higher amount of RCA have lower strengths than those of the control concrete, but over time this difference decreases – after the 6th month, the concrete with 20 % RCA practically disappears, and the concrete with 100 % KRDM is only 16 %. With an increase in the amount of KRDM in the concrete, the depth of carbonization increases, and in the presence of 60 % and 100 % KRDM, it would be necessary to take measures for the corrosion protection of steel reinforcement embedded in these concretes.

¹ Boyan Petrov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: bpetrov_fce@uacg.bg