

СТРУКТУРНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА БЕТОННИ СМЕСИ С ЕСТЕСТВЕН И РЕЦИКЛИРАН ЕДЪР ДОБАВЪЧЕН МАТЕРИАЛ ПРИ ВИСОКИ ТЕМПЕРАТУРИ

Венцеслав Стоянов^{1,2}, Добромир Попов², Вилма Петкова^{3,4}, Екатерина Серафимова⁵

¹Висше строително училище „Любен Каравелов“, Строителен факултет, София

²Академия на МВР, Факултет „ПБЗН“, София

³Нов Български университет – София

⁴Институт по минералогия и кристалография – Българска академия на науките

⁵Химикотехнологичен и металургичен университет – София

e-mails: vensy.stoyanov@vsu.bg; vensy.stoyanov@gmail.com

Ключови думи: циментни бетони, високотемпературни изпитвания, рециклирани добавъчни материали, анализ на микроструктура

Резюме: Съставът и характеристиките на добавъчните материали (естествени и рециклирани - ЕДМ), използвани при производството на бетонните смеси, са анализирани чрез няколко физични и химични изпитвания. Бетонната смес и втвърдените бетони са изпитани чрез стандартни методи. Изготвените бетонни пробни тела са нагreti до 800°C и изпитани за определяне на тяхната якост на натиск. За да се оцени макроструктурата на бетона са проведени наблюдения, които са допълнени със снимков материал, получен от оптичен микроскоп.

На основата на направените измервания и сравнителни анализи се установи, че якостта на натиск на бетона, изготвен само с естествени ЕДМ е по-голяма от тази на бетона, в който част от този компонент е заменен с рециклиран. Коефициентите на редуция на якостта на натиск на бетона с рециклиран ЕДМ са по-високи, което се обяснява с по-ниската якост на керамичните керемиди, която лимитира якостта на натиск на бетона, измерена при 20°C. При нагряване около 500°C започват да се образуват пукнатини в циментовия камък и в контактния слой между циментовия камък и естествените добавъчни материали. Адхезията между керемидите и циментовия камък е по-добра от тази между циментовия камък и варовиковия едър добавъчен материал.

След обобщаване на всички анализи се прави заключението, че използването на бетон с максимално допустимо заместване на естествен ЕДМ с рециклиран от керемиди няма да доведе до изменения в технологията на изготвяне на бетонните смеси и формираната структура на втвърдения бетон. Високият процент на заместване на естествен ЕДМ ще доведе до намаляване на класа по якост на натиск на бетон, но същевременно ще подобри неговата топлоустойчивост.

STUDY OF CHANGES IN CONCRETE MACROSTRUCTURE WITH RECYCLED COARSE AGGREGATES FROM CERAMIC ROOF TILES AT HIGH TEMPERATURES

Ventseslav Stoyanov^{1,2}, Dobromir Popov², Vilma Petkova^{3,4}, Ekaterina Serafimova⁵

¹University of Structural Engineering and Architecture, VSU „L. Karavelov”,
Faculty of Construction, Sofia

²Academy of the Ministry of Interior, Department of Safety and Prevention – Sofia

³New Bulgarian University, Department of Natural Sciences – Sofia

⁴Institute of Mineralogy and Crystallography „Acad. Ivan Kostov” – Bulgarian Academy of Sciences – Sofia

⁵University of Chemical Technology and Metallurgy, Department of Engineering Ecology

e-mails: vensy.stoyanov@vsu.bg; vensy.stoyanov@gmail.com

Keywords: cement concretes, high temperature tests, recycled aggregates, structural analysis

Abstract: The composition and characteristics of the aggregates (natural and recycled) used in the production of concrete mixtures were analysed by several physical and chemical tests. Both fresh and hardened concretes were tested by standard methods. The prepared concrete samples were heated to 800°C. At different

temperatures they were tested to determine their compressive strength. The structure of concrete was evaluated by observations, which were supplemented with pictures obtained by an optical microscope.

On the basis of the measurements and comparative analysis it is found that the compressive strength of concrete prepared with natural coarse aggregates only is greater than concrete, in which a portion of this component is replaced by recycled one. The ratios of reduction of the compressive strength of concrete with recycled coarse aggregates are higher, which can be explained by the lower strength of the ceramic tiles, which limits the compressive strength of concrete, measured at 20 °C. When heated at 500 °C cracks in the hardened cement paste begin to form and the contact layer between the hardened cement paste and natural aggregates. The adhesion between the ceramic tiles and the hardened cement paste is better than that between hardened cement paste and limestone-based coarse aggregate.

After summarizing all analyses, one may conclude that the use of concrete with a maximum substitution of natural coarse aggregate by recycled one will not lead to changes in the technology of preparation of fresh concretes, as well as formed structure of hardened concrete. The high percentage of substitution of natural coarse aggregate will reduce the compressive strength class of the hardened concrete, but will also improve the resistance of concrete at high temperatures.

Въведение

Бетонът е един от основните строителни материали, намиращи широко приложение в съвременното строителство. Годишното потребление на бетон в света е над 10 пъти над това от стоманата. В строежите се използва два пъти повече бетон в сравнение с всички други строителни материали, взети заедно. Отнесено за всеки човек на земята потреблението на бетон е около три тона годишно, което го прави вторият след водата най-консумиран материал от хората [1]. Няма съмнение, че в близко бъдеще бетонът ще остане основния конструктивен строителен материал.

Един от основните недостатъци на бетона е голямото количество въглероден диоксид (CO₂), отделен при всички етапи на производство и приложение. Той е отговорен за 4–8 % от световното производство на CO₂, като само въглищата, нефта и газта са по-големи източници на парникови газове. Преодоляването на това вредно въздействие на бетона на околната среда се търси в намаляване количеството или пълното заместване на портландциментовия клинкер, на който се дължи половината от емисиите на CO₂ на бетона.

Предимство на бетона е възможността в него да се влягат странични продукти и отпадъци от различни индустрии. Съгласно насоките за принципите и практиките за управление на кръговата икономика с най-голяма тежест се разглежда възможността за влагане в бетоните на строителни отпадъци (СО). Този вид отпадъци, които се получават при строително-монтажни работи и от премахване на строежи, се състоят от различни материали, повредени или неизползвани по различни причини по време на строителството, вкл. образувани при подготовката на строителната площадка.

Отпадъците от строителство и разрушаване, образувани в Европейския съюз (ЕС) през 2014 г. са 869 млн тона, което е 34,7 wt % от всички потоци отпадъци [2]. Най-голямо е количество отпадъци, образувани строителните материали на основа свързващи вещества (бетон, мазилка, цимент и др.) – 32 wt % и на тухли – 25 wt %, докато частта, образувана от покривна керамика е 4 wt % [3]. Подобни стойности се дават и в изследването за сравнение на количествата СО на два града, като стойностите за керемидените отпадъци са 3,7 wt % и 4,8 wt % [4]. На основата на тези данни може да се определи, че образуваните отпадъци от керамични продукти за покриви в ЕС са около 35 млн. тона годишно.

Влагане на керамичен рециклиран добавъчен материал в бетон

От 2012 г. у нас е обнародвана Наредба за управление на строителните отпадъци и за влагане на рециклирани строителни материали [5]. Една от целите на тази наредба е да се увеличи употребата на рециклирани строителни материали (PCM) чрез изпълнение на количествени цели за тяхното влагане в проекти, финансирани с публични средства (Приложение № 8 на [5]). Изискванията са твърде ниски – например, за ново строителство на строежи, изпълнявани след 2020 г., количеството на PCM трябва да е над 2 %wt %, но Наредбата постановява, че PCM (строителните продукти), получени в резултат на оползотворяване на СО (категория 17 от Евр. списък на отпадъците), могат се влягат в строежите само, ако осигуряват изпълнението на основните изисквания към строежите и отговарят на техническите спецификации, определени със Закона за техническите изисквания към продуктите, т.е. отговарят на изискванията и допуските на хармонизираните стандарти, разработени за продуктите в съответствие с чл. 17 от Регламент (ЕС) 305/2011 г. [5].

Поради голямото годишно потребление на бетон, изискването за влагане на РСМ най-лесно може да се постигне чрез използване на рециклирани добавъчни материали (РДМ). Подходящите източници на РДМ от СО спадат към подгрупа с код 17 01 съгласно Наредба № 2 от 2014 г. за класификация на отпадъците [6]. От неопасните строителни отпадъци бетонът (17 01 01 код на СО) и тухлите (17 01 02 код на СО) притежават висока порьозност, което предопределя получаването на порьозни РДМ, използването на които крие на проблеми в технологичните процеси на производство на бетонна смес с тези РДМ. Поради тази причина най-перспективни за производство на РДМ за СО с код 17 01 03 в които попадат керемиди, плочки, фаянсови и керамични изделия [5, 6]. Количествената цел за материално оползотворяване на този вид СО за след 2020 г. и всяка следваща година е 70 wt %. Поради необходимостта от селективно отделяне, разделяне и съхраняване на СО към момента най-перспективно е използването на СО от керемиди за влагане в като добавъчен материал бетонни смеси.

Стандартът БДС EN 206:2013+A1:2016 позволява използването на РДМ (т. 5.2.3.4). В приложение Е, което е информационно, на този стандарт са описани препоръки само за използването на едър РДМ. Поставени за граници за заместване на естествени обикновени едри добавъчни материали (ЕДМ) с едри РДМ (РЕДМ), съответстващи на БДС EN 12620:2002+A1:2008, във връзка с класовете по въздействие на околната среда. В тези хармонизирани стандарти изискванията за влагане на тухли и керемиди са еднакви, въпреки различната им структура (порьозност), определяща различни свойства (водопопиваемост, водопропускливост, мразоустойчивост, механични характеристики) и приложение.

Основните изследвания в областта на влагане на РСМ в бетони са съсредоточени в използването на РЕДМ от бетони [7–9], като тяхното прилагане е довело до поставянето на ограничения в стандарти – БДС EN 206:2013+A1:2016 (бетони X0, XC1-4, XF1, XA1, XD1; максимално на заместване 30 wt % с РЕДМ тип А, максимален клас C30/37 C40/50 при използване на РДМ тип В), BS 8500-2:2006 (20 wt % максимално заместване на ЕДМ с РЕДМ; максимален клас C40/50 за X0, XC1-4, XF1, DC1 (устойчивост на химична агресия) и др. Влагането на РДМ от СО от тухли в бетони води до намаляване на всички механични характеристики при еквивалентни водоциментно отношение и количества на естествени ЕДМ [7]. Бетони с РЕДМ от тухли са с намален риск за притичане на алкало-силицева реакция и имат понижена карбонизация, което вероятно се дължи на повишеното количество цимент, необходимо за получаване на равноякостен бетон [7]. Съществено при това тълкуване е приемането, че в изследванията и стандартите се използва тегловно заместване, вместо заместване на ЕДМ по обем.

От своя страна керемидите имат по-плътна структура, съответно плътност и якости, от тази на тухлите и биха имали по-добър потенциал за замяна на ЕДМ в бетонните. Допълнително предимство е и тяхната голяма топлоустойчивост, дължаща се на процесите при тяхното получаване при висока температура. Те се отнасят към инертните отпадъци, за които не е необходимо провеждане на изпитване за да се докаже, че не съдържат опасни вещества. В литературата практически липсват данни за поведението на бетони с вложени РЕДМ от СО от покривна керамика. Също така са твърде малко изследванията поведението на бетони с рециклирани добавъчни материали при повишени температури. Основният проблем в изучаването и сравнителните анализи е голямото разнообразие от РЕДМ и наличието на много примеси в тях. Те трудно класифицират – в един клас РЕДМ от бетони едновременно попадат 100 wt % натрошени тухли и смес от 94 wt % натрошен бетон и 6 wt % натрошени тухли [7].

Материали, проби и методи за изпитване

Изследването на поведението при повишени температури на бетон с вложен РЕДМ от СО с керамичен произход се осъществи чрез приготвяне и сравнителни изпитвания на два вида бетонни смеси: обикновен бетон (БО) и бетон, в който ЕДМ е заменен с 20 wt % натрошени керемиди (БК). Този избор позволява да се направи сравнение на поведението на БК с това на БО, чието поведение при температури до 800 °С е интензивно изследвано и у нас [11, 12].

Пробите бяха изготвени със смесен портландцимент СЕМ II/B-LL/32,5 R, производство на Холсим АД, с. Бели извор България. Циментът съдържа смлян варовик (до 35 wt %), който не се разлага до 800 °С и пренебрежимо количество органичен въглерод (под 0,2 wt %). Плътностите на цимента бяха определени лабораторно: специфична плътност $\rho = 3110 \text{ kg/m}^3$ и обемна плътност в свободно насипно състояние $\rho_b = 1050 \text{ kg/m}^3$. Дребният добавъчен материал (ДДМ) представляваше речен, среднозърнест пясък със $\rho = 2460 \text{ kg/m}^3$ и $\rho_b = 1570 \text{ kg/m}^3$. Естественият ЕДМ бе трошен камък, получен от тъмно сив на цвят варовик, фракция 4/11 mm, с плътности $\rho = 2640 \text{ kg/m}^3$ и $\rho_b = 1520 \text{ kg/m}^3$. Едрият РДМ бе получен от керемиди тип „Марсилски“, от които първоначално беше отделена пръстта и други отпадъци, след което бяха

старателно измити и натрошени. Натрошеният материал бе фракциониран със сита 4 mm и 16 mm, след което най-големите зърна бяха отстранени. По този начин геометричните характеристики на РДМ бяха уеднаквени с тези на ЕДМ, а поради крехкото разрушение на керемидите формата на получените зърна РЕДМ бе също много близка до тази на използвания трошен камък. Полученият РЕДМ бе с плътности $\rho = 1630 \text{ kg/m}^3$ и $\rho_b = 830 \text{ kg/m}^3$, като бе определена и обемната плътност във водонапито състояние – 960 kg/m^3 .

От тези компоненти бяха изготвени следните бетони (прибл. 1 m^3):

- обикновен бетон (БО): цимент – 400 kg; вода – 210 l; ДДМ (пясък) – 650 kg; ЕДМ (трошен камък) – 1040 kg;
- бетон с 20 wt % РДМ (БК): цимент – 400 kg; вода – 210 l; ДДМ (пясък) – 650 kg; ЕДМ (трошен камък) – 832 kg; РДМ (трошени керемиди) – 208 kg.

Бетонните смеси се приготвиха по стандартна процедура. Преди използването на РЕДМ той бе оставян да престои във вода за едно денонощие, с цел достигане на висока степен на водопопиване, която предотвратява абсорбирането на направна вода. Двете бетонни смеси имаха слягане 100 mm (клас S3), определено по БДС EN 12350-2:2009. Изготвянето на пробните тела с размери 100/100/100 mm, тяхното отлежаване и изпитване бе осъществено съгласно изискванията на групата стандарти БДС EN 12390 (части 1–4). За отлежаването на пробите бе избрано след декофрирането те да отлежават във вода с температура $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ непосредствено до началото на определяне на тяхната плътност и якост на натиск в стайно и нагрято състояние.

Всички пробни образци, освен тези които ще бъдат изпитани на стайна температура, се подреждат внимателно в Електрическа лабораторна камерна пещ с диапазон до $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, производство на завод „Елпром Балчик“, тип ПЕК 45, която чрез помощта електронен терморегулатор се нагрява бавно със скорост около $2 \text{ }^\circ\text{C/min}$. Температурата на пробите се следи с термодвойки, вбетонирани в центъра (на 5 cm дълбочина) на пробни тела от БО и БК. При започване на нагряването беше наблюдавано, че пробите с РЕДМ (БК) се нагряват с $30\text{--}60^\circ\text{C}$ по-бавно от БО и тази разлика се запази почти до края на изпитването. Когато пещта достигне до необходимата температура, пробните тела чрез издърпване с метална кука внимателно се поставят върху метален поднос и веднага се изпитват за определяне на тяхната якост на натиск чрез машина за изпитване на натиск с хидравлично действие, Клас 3, Тип WK-2. Изпитването продължава до достигане на $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Разрушените от изпитването на натиск бетонни пробни тела се използват за наблюдение на формираната макроструктура, вкл. характера на нейното разрушаване, а на отделени парчета от пробите микроструктурата се изучаваше чрез дигитален микроскоп BRESSER JUNIOR DM400 при увеличения $20\times$, $80\times$ и $350\times$.

Резултати и анализ

Резултати за плътността и якостта на натиск

Плътността на бетонните, определена като усреднена от три проби, при стайна температура в естествено сухо състояние са 2230 kg/m^3 (за БО) и 2120 kg/m^3 (за БК). Теоретичната специфична плътност се изчисли по формулата за смесите, в която участват масата и специфична плътност на всеки компонент, като тази плътност за БО е 2307 kg/m^3 , а за БК – 2200 kg/m^3 . Това означава, че порьозностите на двата вида бетона са практически еднакви – $3,3 \%$ и $3,6 \%$.

Тъй като размерът на кубчетата не е с размери 150/150/150 mm и взимайки под внимание и начина на съхраняване на пробните тела, якостта на натиск се изчисли съгласно БДС EN 206:2013+A1:2016/NA:2017 по формулата:

$$(1) \quad f_c = K_f \cdot K_s \frac{F}{A_c},$$

където: F е максималния товар при разрушаването;

A_c е площта на напречното сечение на пробното тяло, върху която действа силата на натиск, изчислена по избраните размери на пробното тяло;

K_f е корекционен коефициент за влиянието на формата и размера на пробното тяло;

K_s е коефициент, който отчита условията за съхранение на пробните тела.

Корекционният коефициент за използваните кубични пробни тела е $K_f = 0,95$, а $K_s = 1$, тъй като съхранението на телата бе по БДС EN 12390-2:2009, като $K_s = 1$ за изпитване след нагряване. Данните за изчислената якост на натиск f_c при различни температури е показана в

табл. 1. В тази таблица е определен и коефициентът на редукция на якостта на натиск γ_T при определена температура по формулата:

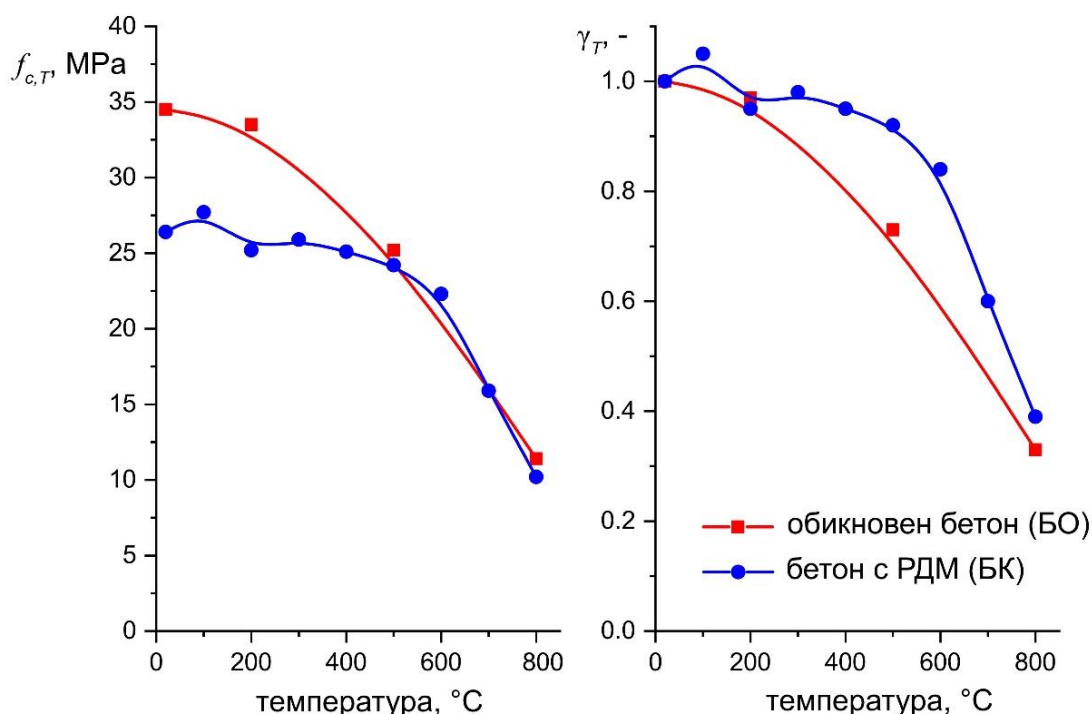
$$(2) \quad \gamma_T = \frac{f_{c,T}}{f_{c,20}}$$

където: $f_{c,20}$ е якостта на натиск на бетона при стайна температура (20 °С);

$f_{c,T}$ е якостта на натиск на бетона при температура T .

Изменението на якостите на натиск $f_{c,T}$ и коефициентите на редукция на якостта на натиск γ_T , определени при различна температури, на представени на Фиг. 1.

При 20 °С якостта на натиск на обикновения бетон е 34,5 МПа, а якостта на натиск на бетона с керамичен РЕДМ е 26,4 МПа. Това означава, че използвания обикновен бетон е вероятно клас по якост на натиск С 25/30, а заместването на 20 wt % естествен ЕДМ с керамичен РЕДМ намалява неговия клас до С 20/25 или С 16/20. Този извод се припокрива с подточка НА.Е.3.1 (1) на БДС EN 206:2013+A1:2016/НА:2017, която постановява, че ЕДМ могат да се използват за производство на бетон с клас по якост на натиск до С16/20.



Фиг. 1. Изменение на якостта на натиск, $f_{c,T}$, и коефициента на редукция на якостта на натиск, γ_T , на бетон с естествен ЕДМ (БО) и бетон с РЕДМ (БК) при повишаване на температури

С увеличаване на температурата якостта на бетоните намаляват като стойностите за обикновения бетон се припокриват с табличните данни за бетон с варовикови добавъчни материали, дадени в БДС EN 1992-1-2:2005 Еврокод 2: Проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции. Част 1–2: Общи правила. Проектиране на конструкции срещу въздействие от пожар. Табличните стойности за γ_T в хармонизирания стандарт за проектиране на бетонни и стоманобетонни конструкции са 0,74 (при 500 °С) и 0,27 (при 800 °С), докато получените стойности за бетона с естествен ЕДМ са: 0,73 (при 500°С) и 0,33 (при 800 °С). Съответните стойности на γ_T за бетона с керамичен РЕДМ са: 0,92 (при 500°С) и 0,39 (при 800 °С). Тези по-високи стойности могат да се обяснят с по-ниската якост на керамичните керемиди, която вероятно лимитира якостта на натиск на бетона.

Проби, нагрети и разрушени при 200 °С



а)



б)

Проби, нагрети и разрушени при 500°С



в)



г)

Проби, нагрети и разрушени при 800°С



д)



е)

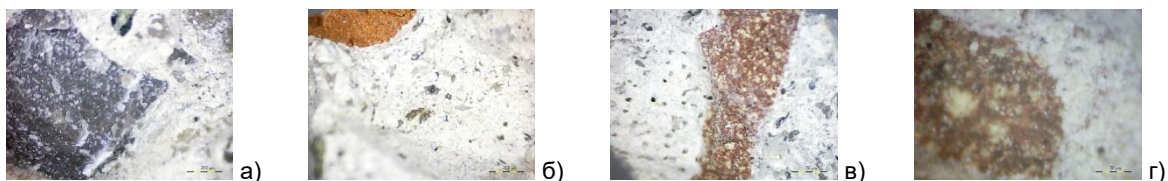
Фиг. 2. Макроструктура на бетонни проби, разрушени при различна температура: а), в) и д) бетон без рециклирани доб. материали; б), г) и е) бетон с рециклирани добавъчни материали

При 500 °С якостните на двата бетона се изравняват, което означава, че якостта на натиск циментовия камък и се е намалила под якостта на натиск керамиката (керемиден отпадък). По същия начин вероятно относително голямото напълване с РДМ (20 wt%) не позволява да се прояви ефекта на леко повишаване на якостта на натиск в интервала 100–200 °С, който се дължи в резултат на намаляване на обема на порите от зърна и частици с увеличен обем (БО не е изпитван в този температурен интервал).

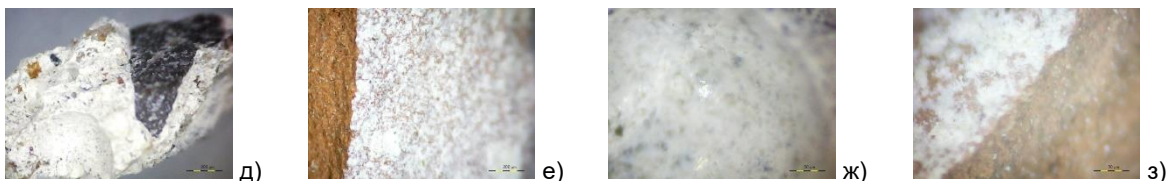
Наблюдения на структурата на изследваните бетони

Структурата на изследваните бетони е представена чрез снимков материал на макроструктурата (фиг. 2) и микроструктурата (фиг. 3) на бетонни проби, които са нагрявани и разрушавани при различна температура. Ясно може да се оцени, че с нарастване на температурата бетонът променя своя цвят, което се дължи на глинестите частици, които са внесени в него чрез пясъка.

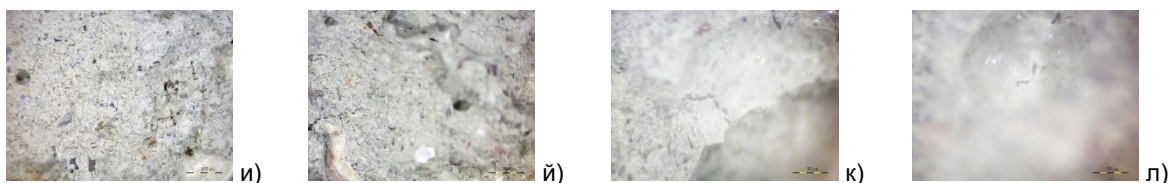
Проби, нагreti и разрушени при 200°C



Проби, нагreti и разрушени при 500°C



Проби, нагreti и разрушени при 800°C



Фиг. 3. Микроструктура на бетонни проби с керамични рециклирани добавъчни материали, разрушени при различна температура:
а), б), д), е), и) и й) – увеличение 20х; в), г), ж), з), к) и л) – увеличение 80х

Разрушенията в пробните тела, изпитани при 200°C са предимно в краищата и ръбовете на куба, през керемидения РЕДМ и отчасти през естествения ЕДМ (фиг. 2а и 2б). Относително ниските температури на нагряване (до 200 °C) не водят до образуване на пукнатини в циментовия камък (ЦК) (фиг. 2а, 3а и 3б). Не се наблюдават пукнатини между ЦК и добавъчните материали, което определя, че до тази температура адхезията между ЦК и ЕДМ и РЕДМ не се нарушава. Разрушението на БК от натоварване на натиск е през РЕДМ, което потвърждава заключението в т. 4.1, че керамичният РЕДМ е определящо за ниската якост на натиск на този бетон, в сравнение с БО, в който няма РЕДМ.

Обработката на снимковия материал на проби нагreti и разрушени при 500 °C показва, че съществува добра адхезия между циментовия камък и добавъчните материали. Отчасти са започнали да се формират пукнатини, но те са в своя начален стадий на развитие. Не всички разрушения са през естествения ЕДМ. От разрушените при изпитването на натиск пробни тела свободно изпадат зърната, което показва че към тази температура ЦК се е обезводнил и започнал да се свива. От друга страна зърната на ЕДМ и части на ЦК увеличават своя обем, като тези процеси водят до загуба на адхезия между ЦК и ЕДМ. Този тип разрушения не са толкова ясно изразени в бетона с РЕДМ (фиг. 3 д-ж). Вероятно при 500 °C коефициентите на линейните термични разширения на ЦК и керамичния РЕДМ са приблизително еднакви (фиг. 3е и 3з).

При 800 °C освен че циментовия камък е силно потъмнял, повърхността на частиците на естествения ЕДМ е бяла. Това е признак за протекла реакция на декарбонизация на варовиковия ЕДМ. Частиците на ЕДМ свободно изпадат от разрушения бетон (фиг. 2д и 2е), докато тези на РЕДМ са все още свързани с циментовия камък. Наблюденията на микроструктурата показват, че при тази висока температура в материала вече са се формирали пукнатини, дължащи се на реакции на разлагане в ЦК и разлики в коефициентите на линейните термични разширения на компонентите при високите температури.

Изводи

Проведеното изследване на бетон с максимално допустимо заместване на естествен ЕДМ с рециклиран ЕДМ от керемиди показва, че това няма да доведе до изменения на технологията на изготвяне на бетонните смеси и формираната структура на втвърдения бетон. Високият процент на заместване на естествен ЕДМ ще доведе до намаляване на класа по якост на натиск на бетон, но същевременно ще подобри неговата топлоустойчивост.

Благодарности

Авторите изказват своята благодарност за финансовата подкрепа на Департамента по природни науки, Лаборатория по химия (МФ) в НБУ и на Катедра „Управление на безопасността и превенция“, Лаборатория „Механични изпитвания на строителни материали“ в Академия на МВР.

Литература:

1. Gagg, C. R., Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, 40, 2014, 114–140.
2. Statistics Explained, http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/c/c7/Waste_generation_by_economic_activities_and_households%2C_EU-28%2C_2014_%28%25%29_YB17.png
3. Eales, A., M. Clifford, *Sustainability and Engineering*, University of Nottingham, 2013, (e-book)
4. Asgari, A., T. Ghorbanian, N. Yousefi, D. Dadashzadeh, F. Khalili, A. Bagheri, M. Raei, and A. Hossein, Quality and Quantity of Construction and Demolition Waste in Tehran, *J Environ Health Sci Eng.* 2017 Jun; 15: 14.
5. Наредба за управление на строителните отпадъци и за влагане на рециклирани строителни материали, приети с ПМС № 277 от 5.11.2012 г. (отм.), приета ПМС № 267 от 05.12.2017 г.
6. Наредба № 2 от 23 юли 2014 г. за класификация на отпадъците (обн. ДВ. бр.66 от 8.08.2014 г., посл. изм. ДВ. бр.46 от 1.06.2018 г.)
7. Paine, K. A, R. Dhir, *Recycled Aggregates in Concrete: A Performance-related Approach*, *Magazine of Concrete Research* 62(7), 2010, 519–530.
8. Pepe, M., *A Conceptual Model for Designing Recycled Aggregate Concrete for Structural Applications*, Springer Theses, 2015, 167 p.
9. Topçu, İ. B., S. Şengel, *Properties of concretes produced with waste concrete aggregate*. *Cement and Concrete Research* 34 (8), 2004, 1307–1312.
10. Pacheco, J., J. de Brito, C. Chastre, L. Evangelista, *Experimental Investigation on the Variability of the Main Mechanical Properties of Concrete Produced with Coarse Recycled Concrete Aggregates*, *Construction and Building Materials*, 201, 2019, 110–120.
11. Попов, Д. Д., *Изследване якостта на натиск на бетон с портландцимент и огнеупорни*, дипл. работа, „Пожарна безопасност и защита на населението“ на Академия на МВР 2018, 76 с.
12. Ценов, Ц. К., *Строителни материали. Състояние при пожар, 3-то доп. и прераб. изд.*, Fplus Ltd., 2015, 242 с.