



Получена: 12.01.2018 г.

Приета: 09.02.2018 г.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СЦЕПЛЕНИЕТО НА СТОМАНЕНА АРМИРОВКА С БЕТОН, СЪДЪРЖАЩ РЕЦИКЛИРАНИ ДОБАВЪЧНИ МАТЕРИАЛИ ОТ СТРОИТЕЛНА КЕРАМИКА

Б. Петров¹, Р. Захариева²

Ключови думи: керамични строителни отпадъци, рециклирани добавъчни материали, олекотени бетони, сцепление на армировка с бетон, енергия на разрушение

РЕЗЮМЕ

Изискванията за енергийна и ресурсна ефективност в строителството налагат оползотворяване на строителните отпадъци за строителни цели. В този контекст, керамичните отпадъци могат да бъдат използвани като едри рециклирани добавъчни материали (КРДМ) за направата на олекотени, леки конструктивни и леки бетони. Настоящата публикация е посветена на сцеплението на стоманена армировка с такива бетони (БКРДМ). Изследвано е влиянието на различни фактори от състава на бетона, сред които процент на влагане на КРДМ. Модифицирана е постановката за изпитване на сцепление при изтръгване. Установено е, че сцеплението при изтръгване на армировъчен прът от БКРДМ намалява незначително при заместване до 60% на естествения трошен камък с КРДМ и е едва с 15% по-малко при пълно заместване, при равни други условия. Влагането на КРДМ води обаче до повишаване на енергията за пълно разрушение на връзката, тъй като част от енергията се изразходва за срязване на зърната на КРДМ, а не само за разрушение на цименто-пясъчната матрица, както е при бетоните с плътни ЕДМ. Доказано е, че въпреки някои особености на бетоните с КРДМ, те могат да бъдат използвани за стоманобетонни конструкции.

¹ Боян Петров, д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: petrov_uacg@gmail.com

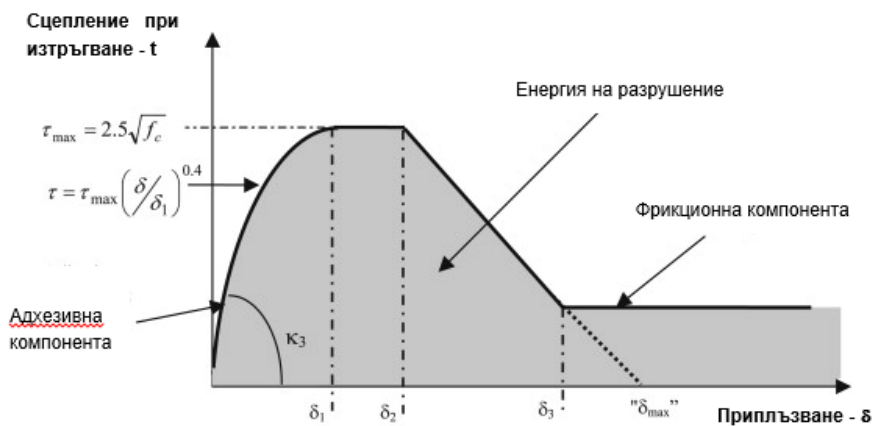
² Румяна Захариева, доц. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: roumiana.zaharieva@gmail.com

1. Въведение

При всички строителни дейности, особено при премахване, реконструкция и рехабилитация на строежи, се генерират огромно количество строителни отпадъци. Европейското и българското законодателство изискват към 2020 г. над 70% от строителните отпадъци да бъдат материално оползотворени (чрез повторна употреба, рециклиране и използване за насипи). Освен това има изискване за влагане на рециклирани материали в строежите, финансирани с публични средства, което понастоящем се осигурява с рециклирани материали от отпадъчен бетон, асфалтобетон и скални материали.

Физичните и механичните характеристики на керамиката, сред които сравнително ниската ѝ обемна плътност и добра якост, я правят подходяща за рециклиране под формата на едър добавъчен материал за направата на бетон. Изготвените с керамични рециклирани добавъчни материали бетони (КРДМ) имат едновременно по-малка обемна плътност, което намалява товарите от собствено тегло на конструкциите и по-малък коефициент на топлопроводност, което води до повишаване на енергийната ефективност.

За използване на бетоните с КРДМ за конструктивни цели (т.е. в стоманобетонни конструкции) е необходимо да се изследва връзката бетон-армировка. При липса на закотвящи елементи, особено важна е големината на силата, която е способна да придвижи пръта през бетонното сечение, т.е. да го „изтръгне“ [1]. Тази сила отразява сцеплението между бетона и армировката, което в англоезичната литература се нарича *bond strength*. Сцеплението зависи главно от адхезията между стоманата и бетона, както и от геометрията на ребрата на армировката. При гладка армировка и/или когато върху нея е нанесено антикорозионно покритие, определяща за сцеплението е силата на триене. Силата на триене е и причината, след преодоляване на адхезията и разрушаване на бетона между ребрата на оребрена армировка, да има остатъчни напрежения на срязване в контактната зона – фиг. 1.



Фиг. 1. Графика сцепление-приплъзване (3)

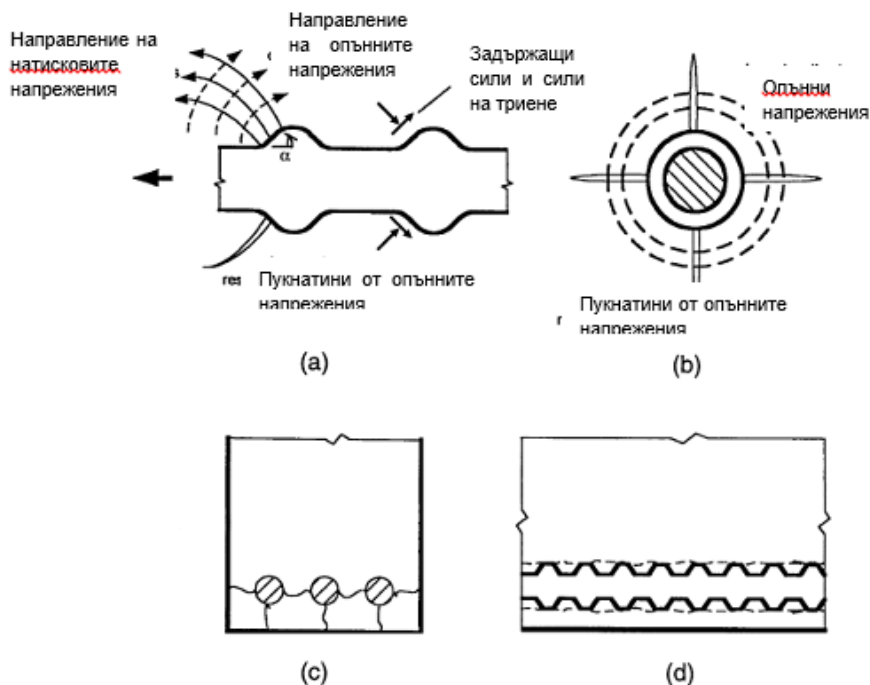
С помощта на ултразвукова дефектоскопия е установено, че в началния етап на натоварване се реализира уплътняване на структурата на бетона, след което започва приплъзване на армировката, дължащо се на разрушителни процеси в контактната зона [2].

При оребрени пръти най-голям дял от силата се предава на бетона чрез ребрата на армировъчните пръти в надлъжна и радиална посока, което е функция от ъгъла на разположение на ребрата (фиг. 2).



Фиг. 2. Сила на сцепление, механизъм на трансфериране (1)

След първоначалната деформация на армировъчния прът, в резултат на опънното усилие в него, около ребрата се създават натискови и опънни напрежения, които водят до появата на пукнатини в бетона в равнини, перпендикулярни и надлъжни на пръта (фиг. 3).



Фиг. 3. Напукване и деформиране при сцепление:

- a) Посоки на главните опънни и натискови напрежения; б) Пукнатини, успоредни на пръта;
 с) Пукнатини между прътите и в бетонното покритие; д) Срязващи пукнатини и местно смачкване при изтеглянето на пръта [1]

Основните параметри, от които зависи сцеплението между бетона и армировката са: якостта на опън и якостта на натиск на бетона (респективно съставът и структурата на бетона), обемът на ефективния бетон около пръта (бетонното покритие), геометрията на пръта и неговата повърхност, видът и относителната площ на ребрата [1]. Според ли-

тературни данни, добавъчните материали с по-добри механични характеристики осигуряват по-голямо сцепление [1, 4]. Друг фактор, влияещ върху сцеплението, е обработваемостта на бетонната смес и нейното уплътняване след полагане в кофража – сместа трябва да е подвижна, без склонност към водоотделяне и/или разслояване, за да се избегне задържането на вода под зърната на добавъчния материал или под хоризонталната армировка и т.нар. „top-bar effect” – в горната част на бетонните елементи се наблюдава допълнително понижаване на сцеплението в тези зони [5]. Уплътняването на сместа чрез вибриране осигурява намаляване на съдържанието на въздух и уплътняване в зоната около армировъчните пръти, което води до повишаване на сцеплението с армировката.

2. Методика на изследването

2.1. Материали

Използвани са цимент СЕМ II А-V 42,5N с активност на 28 ден от 44,7 МРа; речен среднозърнест пясък от кариера „Кривина“; естествен едър добавъчен материал (ЕДМ) фракция е 4/11,2 mm, от кариера „Студена“; КРДМ от същата фракция. КРДМ е моделен – произведен е от плътни тухли с контролирани параметри (якост на натиск 28 МРа и Е-модул 4,7 GPa), но рециклирането е извършено в индустриални условия с инсталацията за рециклиране на строителните, оперираща от 2006 г. на разтоварището в кв. Враждебна на София.

2.2. Проектиране на състава на бетона

Съставите са проектирани за клас по якост на натиск C25/30 и клас по обработваемост S2 (50 – 90 mm). Използван е методът на плътните обеми, с отчитане на някои принципи, характерни при проектиране на състава на леките бетони. Приложено е предварително омокряне на КРДМ с 14% вода по маса, определено въз основа на изследванията за водопопиваемостта на КРДМ. Тази вода, съгласно БДС EN 206 за ефективно водно съдържание, не се взема предвид при изчисляване на водоциментното отношение.

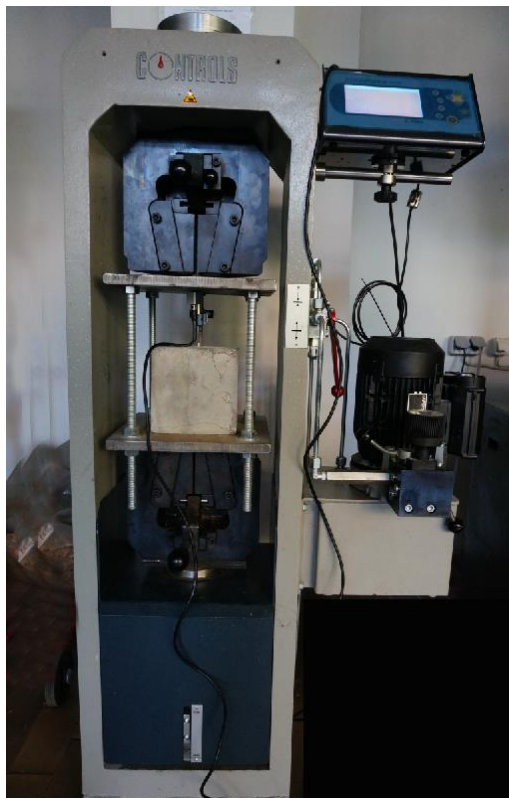
За изготвянето на бетони с различно съдържание на КРДМ, но с еднаква консистенция, при постоянно В/Ц и съдържание на цимент, количеството на суперпластификатора добавка варира, в зависимост от различното съдържание на КРДМ (съответно 0%, 20%, 60% и 100% от общото количество на ЕДМ), количеството на цимента (съответно 300, 350 и 400 kg) и водоциментното отношение (съответно 0,45; 0,5 и 0,55).

Комбинациите на различните нива на вариране на отделните параметри на състава на бетона с КРДМ са подбрани съгласно Метода на планирания експеримент по плана Бокс-Бенкин. Подходът е представен в предишни наши публикации [6, 7].

2.3. Методика на изпитванията

Сцеплението между бетона и армировката е определено по изискванията на RILEM, “Technical recommendations for testing and use of construction materials: RC6, Bond test for reinforcing steel: 2. Pull-out test” и БДС EN 15184 „Продукти и системи за предпазване и възстановяване на бетонни конструкции. Методи за изпитване. Адхезия на армировка с покритие към бетон (изпитване с изтръгване)”.

Изготвена е стоманена рамка (фиг. 4), която да отговаря на изискванията на RILEM и БДС EN 15184, чрез която да се определи сцеплението. Стоманената рамка се състои от две плочи, свързани чрез четири шпилки, за да има възможност да се коригира разстоянието между плочите. Горната плоча се захваща за челюстта на пресата, а в долната плоча има отвор, през който минава в бетонирания прът и се захваща за долната челюст на пресата. Към свободния край на пръта се монтира електронен екстензометър (фиг. 5).



Фиг. 4. Опитна постановка за определяне на сцепление при изтръгване



Фиг. 5. Постановка за определяне на приплъзването при изтръгване (снимка след допълнително разцепване на пробното тяло)

Натоварването се извършва с преса за изпитване на опън CONTROLS с максимална опънна сила 1000 kN (фиг. 4). Отчитането на деформациите се извършва с електронен индуктивен екстензометър (Controls 70 – C0954/C) с обхват 30 mm и точност 0,001 mm (фиг. 5). Екстензометърът се свързва с компютърния модул на пресата и в реално време може да се отчитат силите/напреженията и преместванията.

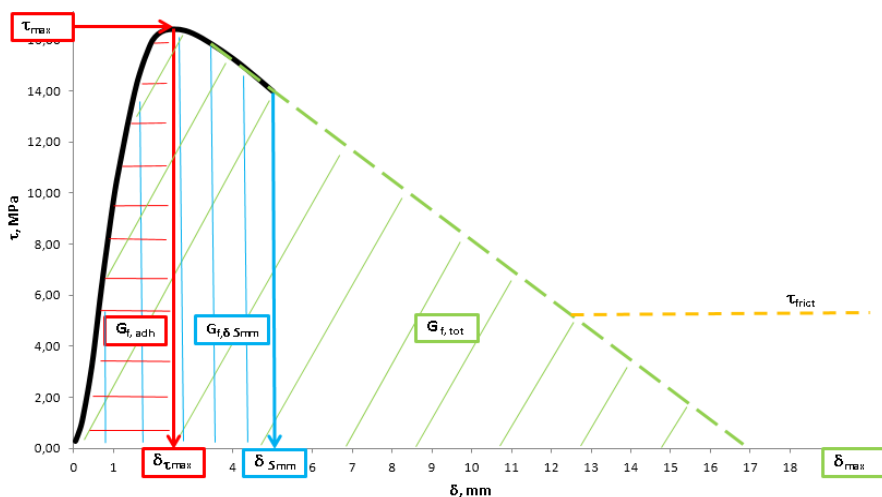
За определяне сцеплението при изтръгване са изготвени кубични пробни тела с размери 150/150/150 mm. В пробните тела е вбетонирана армировъчна стомана с номинален диаметър 12 mm и дължина на контактната зона 100 mm, разположена в средата по височина на пробното тяло. Елиминирането на контакта на бетона и стоманата в двата края се осъществява с предварително (преди бетониране) нахлузване на пластмасови (PVC) тръбички върху армировъчния прът. Пробните тела са отлежавали под вода при температура 20 °C.

Резултатите са представени под формата на работна диаграма „напрежение на срязване τ – преместване δ ”. Прието е, че локалните напрежения в пръта са равни на средноаритметичната стойност, т.е. прието е равномерно разпределение на усилието по продължение на контактната зона (околната повърхнина на вбетонираната част на армировката). Сцеплението при изтръгване е равно на максималното напрежение, изчислено по (1).

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{\pi dl}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

където P_{\max} е максимална изтръгваща сила, N;
 d – номинален диаметър на армировъчната стомана, mm;
 l – дължина на контактната зона, mm.

За локалното приплъзване δ е прието, че то е равно на измереното преместване в свободния край на пръта ΔF . Според *Haskett et al*, ако се пренебрегне силата на триене при падащия клон на диаграмата, максималното приплъзване δ_{\max} може да бъде определено от линейно екстраполиране на падащия клон на диаграмата “ $\tau - \delta$ ” при пресичането му с абсцисата [8]. Максималното приплъзване δ_{\max} съответства на пълното разрушение на връзката бетон-стомана и на изтръгването на армировката.



Фиг. 6. Определяне на енергията на разрушение от графиката „сцепление-приплъзване“

Ефектът на различните рецептурни параметри върху сцеплението и изтръгването е оценен и с помощта на един комплексен параметър – енергията на разрушение G_f , тъй като той отчита едновременно якостните свойства (сцепление) и деформационните свойства (приплъзване). G_f е изчислена от площта под диаграмите “ $\tau - \delta$ ” за някои типични състави на бетона – B0/0/350/0,5; B4/100/400/0,55; B5/100/300/0,55; B7/100/400/0,45 и B9/100/350/0,5 и се измерва в N/m. За разграничаване на различните процеси са изчислени по три стойности на енергията на разрушение, както следва:

- $G_{f,adh}$ – енергията, необходима за преодоляване на адхезията между бетона и армировката. Тя отговаря на приплъзване δ_2 по фиг. 6, съответстващо на τ_{\max} ;

- $Gf,5 \text{ mm}$ – енергията, характеризираща работата, необходима за преодоляване на остатъчната връзка между бетона и армировката за реализиране на приплъзване $\delta = 5 \text{ mm}$, което съответства на разстоянието между ребрата на армировъчните пръти;
- Gf,tot – обща енергия на разрушение – енергията, необходима за пълно изтръгване на армировката от бетона. Тя отговаря на стойността на максималното приплъзване δ_{max} – фиг. 6.

3. Анализ на експерименталните резултати

3.1. Резултати

Резултатите от изпитванията за сцеплението (τ_{max}) варират в границите от 11,63 МПа до 20,32 МПа (табл. 1). Тези стойности са близки до литературните данни за бетоните с конвенционални ЕДМ (от 10 МПа до 25 МПа) от същия клас по якост на натиск [9 ÷ 13], както и до тези за бетоните с рециклирани ЕДМ [15, 16]. Авторите на едно от малкото изследвания в областта на сцеплението между бетони с КРДМ и армировъчна стомана [14] получават по-високи стойности на сцеплението при изтръгване τ_{max} (от 17 МПа до 30 МПа). Вероятната причина за по-големите якости е видът на използвания цимент (СЕМ I) и по-добрите механични свойства на КРДМ.

Таблица 1. Резултати от изследванията върху сцеплението при изтръгване

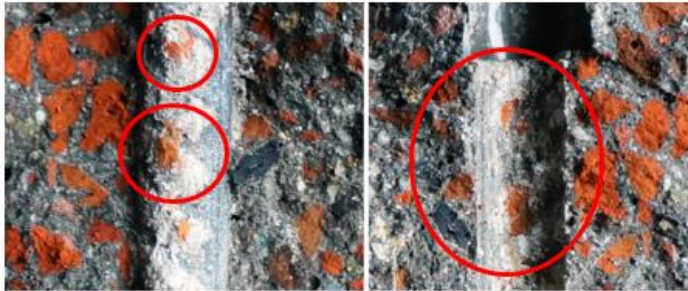
Състав (Озн. № /КРДМ в % /Цимент в kg/m^3 /В/Ц)	τ_{max} МПа	δ (τ_{max}) mm	τ ($\delta=5\text{mm}$) МПа	δ_{max} (екстраполирано), mm	Якост на натиск на 28 ден ($f_{c, 28}$), МПа
Б0 / 0/350/0,5	17,84	2,70	14,93	16,9	46,2
Б1/ 100/300/0,45	18,10	2,30	16,45		34,2
Б2/ 20/400/0,45	18,91	3,52	15,65	12,1	47,2
Б3/ 20/300/0,55	18,30	2,74	14,75	14,4	35,7
Б4 / 100/400/0,55	11,63	2,65	8,86	12,5	26,9
Б5/ 100/300/0,55	12,92	2,40	10,19	14,7	30,6
Б6/ 20/400/0,55	13,34	2,20	9,88		34,0
Б7/ 100/400/0,45	17,41	2,88	15,01	18,4	37,3
Б8 / 20/300/0,45	20,32	2,15	16,18		49,3
Б9/ 100/350/0,5	16,39	2,40	13,97	20,0	36,2
Б10/ 20/350/0,5	17,84	3,00	14,42		42,6
Б11/ 60/400/0,5	19,21	2,50	16,23		44,0
Б12/ 60/300/0,5	15,97	2,63	12,97		35,4
Б13/ 60/350/0,55	14,91	2,40	10,61		30,7
Б14/ 60/350/0,45	19,54	2,40	17,30		45,6
Б15/ 60/350/0,5	17,19	2,40	14,61		37,8

Преместването, съответстващо на τ_{max} варира в границите от 2,15 mm до 3,52 mm, като при съставите с по-високи В/Ц отношения (т.е. при по-деформируема матрица на цименто-пясъчния разтвор) преместването е по-голямо. С увеличаване количеството на КРДМ в бетона, преместването при изтръгване намалява (табл. 1).

Стойностите на максималното приплъзване δ_{\max} са в диапазона 12 – 20 mm, което е близко до резултатите на други изследователи за бетони с якости на натиск $f_{c, 28}$ от порядъка на 25 – 50 МРа, като зависимостта между δ_{\max} и $f_{c, 28}$ е обратно-пропорционална [4, 8].



Фиг. 7. Повърхност на изтръгване на състав Б7 100/400/0,45



Фиг. 8. Срязване през КРДМ, състав Б7 100/400/0,45



Фиг. 9. Разцепване на пробното тяло при изпитване на изтръгване (Б7/100/400/0,45)

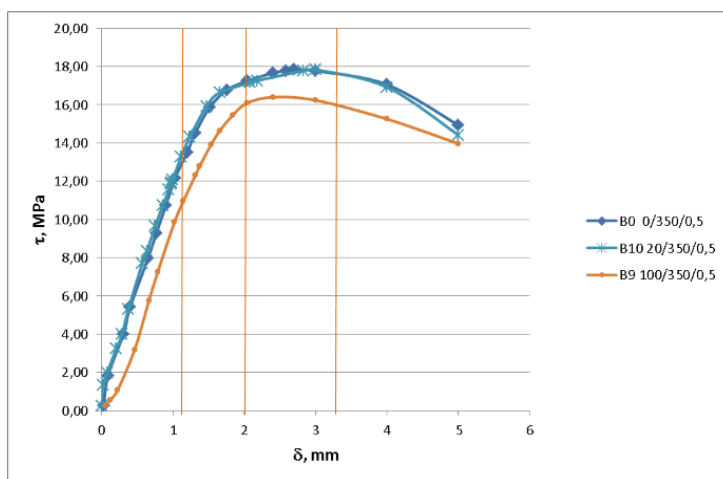
На фиг. 7 и фиг. 8 са показани снимки от повърхността на изтръгване на армировката от бетон със 100% КРДМ. Следите от приплъзването на армировъчния прът и разрушението (срязването) на бетона между ребрата на армировката са ясно различни. Наблюдава се не само срязване на цименто-пясъчния разтвор, но и срязване на зърната на КРДМ, вместо те да се изтръгнат от матрицата, каквато е характерната повърхност на разрушение при бетоните с конвенционални ЕДМ.

При някои от съставите с крехка матрица (с ниски В/Ц) и високо съдържание на КРДМ (Б1/100/300/0,45 и Б7/100/400/0,45), се наблюдава разцепване на пробното тяло. То е в резултат на развитието на опъни напрежения, перпендикулярни на изтръгващото усилие, водещи до бързо развитие на микропукнатини – фиг. 9.

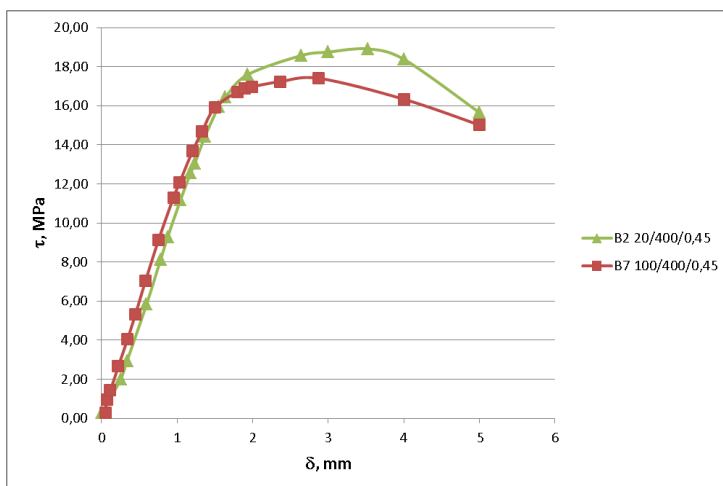
3.2. Работна диаграма „ $\tau - \delta$ ” и енергия на разрушението

Работните диаграми на различните състави имат сходен вид и условно могат да се разделят на 4 участъка:

- Начален – линеен, в който зависимостта между τ и δ за всеки състав на бетона е постоянна, а наклонът ѝ е един и същ и при състави с еднакво В/Ц и съдържание на цимент – фиг. 10 и фиг. 11, но при повишаване на В/Ц отношение наклонът на кривата намалява – фиг. 12. Линеиният характер на кривата се обуславя от съвместната работа на бетона и стоманата, работещи в предимно еластичен стадий. В началото на този етап сцеплението се определя предимно от качествата на цименто-пясъчния разтвор.

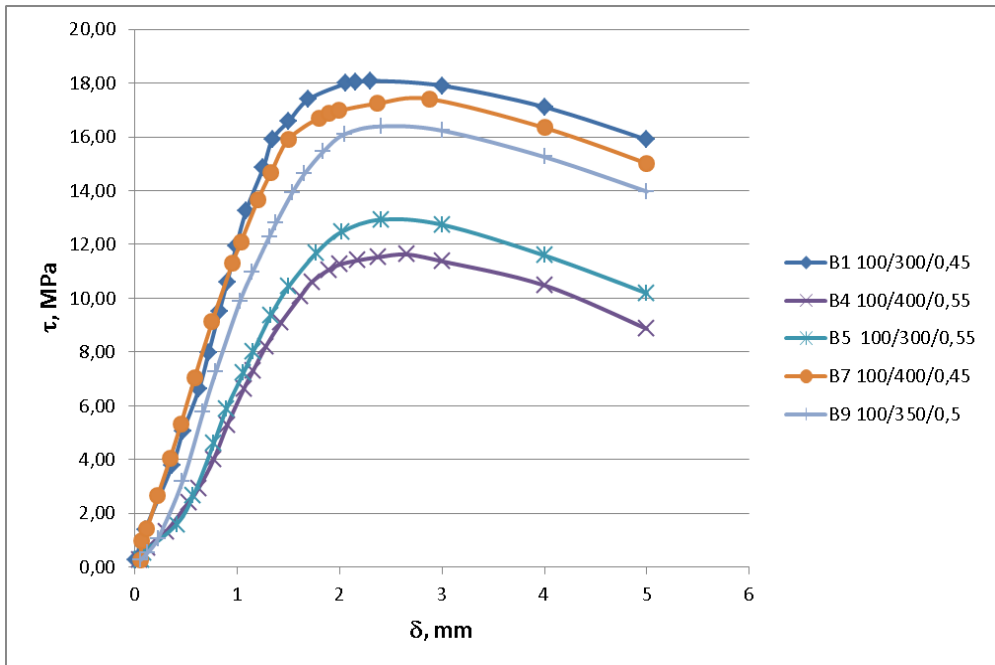


Фиг. 10. Връзка сцепление – приплъзване при различно съдържание на КРДМ (Ц = 350 kg; В/Ц = 0,5)

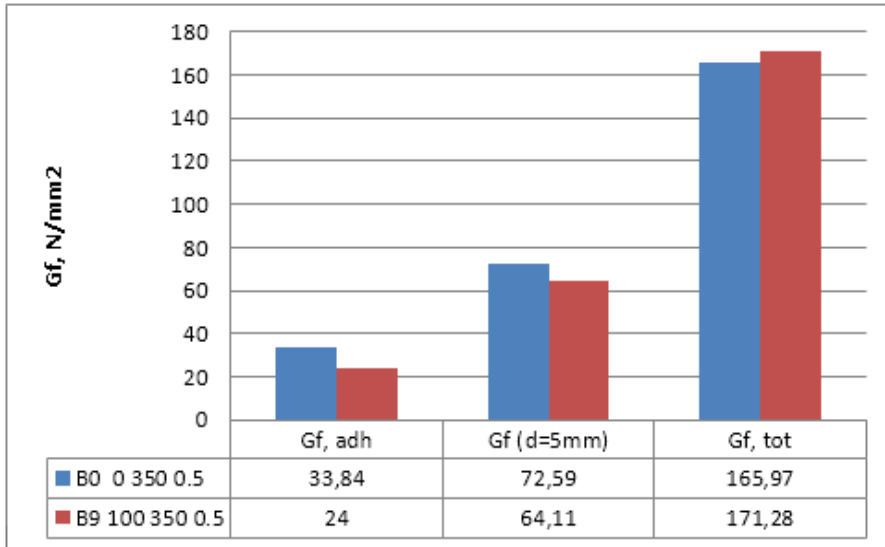


Фиг. 11. Връзка сцепление – приплъзване при различно съдържание на КРДМ (Ц = 400 kg; В/Ц = 0,45)

- криволинеен – при по-високи напрежения, до достигане на τ_{max} , който се дължи на развитие на микропукнатини в контактната зона между бетона и армировката. При 20% съдържание на КРДМ няма разлика в зависимостите между сцеплението и приплъзването, а при 100% КРДМ зависимостта е сходна по вид, но максималното сцепление и отговарящото му приплъзване са по-малки.
- площадка на нарастване на преместванията (наличие на изразено приплъзване) при постоянно напрежение (τ_{max}) при повечето състави. Този почти хоризонтален участък потвърждава модела на СЕВ Model Code 90 [3], а не този на АСИ [1]. Следователно, би-линейният теоретичен модел на връзката τ и δ , който се използва за изчисляване на енергията на разрушение [8] би довел до значителни отклонения, в сравнение с избраната методика за изчисляване на G_f въз основа на площта под работните диаграми;
- падащ клон на диаграмата с почти постоянен наклон, който зависи от съдържанието на КРДМ – колкото то е по-голямо, толкова наклонът е по-малък – фиг. 11, като практически не зависи от В/Ц отношение и количеството на цимента – фиг. 12. Може да се предположи, че по-деформируемите КРДМ, които имат по-добро сцепление с матрицата от естествените ЕДМ, осигуряват по-голямо дисипиране на енергията. По този начин се стига до нарастване на общата енергия, необходима за цялостното изтръгване на армировката от бетона. Следователно, разрушението на връзката „бетон-стомана“ при бетоните със значително съдържание на КРДМ не е толкова крехко като това разрушение при бетоните с естествени ЕДМ.



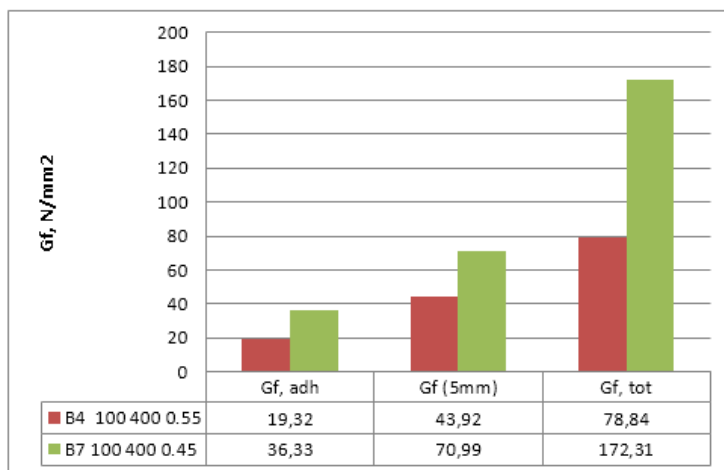
Фиг. 12. Връзка „сцепление – приплъзване“ при съставите със 100% КРДМ



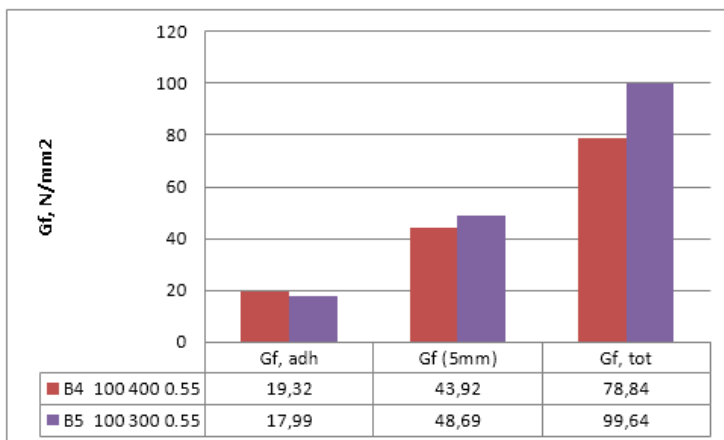
Фиг. 13. Стойности на енергията на разрушение в зависимост от съдържанието на КРДМ

Анализът на данните за отделните компоненти на енергията на разрушение ($G_{f,adh}$; $G_{f,5mm}$ и $G_{f,tot}$) показва, че:

- въпреки, че $G_{f,adh}$ при контролния състав е с около 30% по-висока от тази при състава със 100% КРДМ, стойностите на $G_{f,tot}$ са практически еднакви – следователно за пълното изтръгване на стоманената армировка при двата бетона е необходима една и съща работа – фиг. 13;
- при равни други условия при бетоните с изцяло рециклирани едри добавъчни материали (100% КРДМ), ниското В/Ц (0,45) води до почти двойно повишаване на енергията на разрушение и в трите ѝ разглеждани аспекта, в сравнение с тази при бетоните с по-високо В/Ц отношения (0,55) – фиг. 14;
- при бетоните със 100% КРДМ, но които са с по-голямо съдържание на разтворната компонента (т.е. с по-високо съдържание на цимент) се наблюдава намаляване на енергията, необходима за пълно изтръгване на пръта, въпреки, че стойността на сцеплението е практически една и съща (дори леко по-висока) – фиг. 15;
- по отношение на енергията на разрушение, която е необходима за приплъзване на армировката от 5mm ($G_{f,5mm}$), тя остава с около 12% по-ниска при бетоните със 100% КРДМ, в сравнение със състава с ЕДМ, тъй като при тях по-лесно се реализира приплъзването на армировката – има възможност за срязване на самите зърна на КРДМ (фиг. 15). И при този показател основно значение има качеството на разтворната компонента – В/Ц от 0,45 води до повишаване на $G_{f,5mm}$ с около 60% спрямо $G_{f,5mm}$ на бетона с В/Ц = 0,55.



Фиг. 14. Влияние на В/Ц върху енергията на разрушение



Фиг. 15. Влияние на количеството на цимента върху енергията на разрушение при бетоните със 100% заместв. на ЕДМ с КРДМ

4. Изводи

Видът на работната диаграма „ $\tau - \delta$ “ при бетоните с КРДМ е със сходен характер на диаграмата при бетоните с пълтни ЕДМ. Като най-подходящ теоретичен модел се очертава този съгласно СЕВ Model Code 90.

Съдържанието на КРДМ от 20% практически не се отразява върху сцеплението на бетона с армировката.

Влагането на КРДМ в количество от 60% и 100% намалява сцеплението съответно с 3% и 15% при равни други рецептурни условия. Това понижение обаче може да се компенсира с редуциране на водоциментното отношение.

Якостно-деформационните характеристики на разтворната компонента, изразени с В/Ц отношение, имат най-голям ефект както върху големината на сцеплението на бе-

тоните с КРДМ с армировката, така и върху енергията на разрушение, необходима за пълното изтръгване на армировъчния прът. При някои от съставите на бетоните с КРДМ с твърде крехка матрица се наблюдава разцепване на пробните тела при изпитване на изтръгване, което е израз на по-малката степен на ограничаване на деформациите от този бетон – вероятно в подобни случаи би следвало да се предвиди по-голяма дебелина на бетонното покритие.

Влагането на КРДМ води до повишаване на енергията за пълно разрушение на връзката, тъй като част от енергията на разрушение се изразходва и за срязване на зърната на самите КРДМ, а не само за разрушение на цименто-пясъчната матрица, какъвто е случаят на бетоните с плътни ЕДМ.

Изследванията върху сцеплението на армировка с бетон с КРДМ допълват изводите от предишни наши изследвания [6, 7], че въпреки някои особености на тези бетони, те могат да бъдат използвани за направата на стоманобетонни конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. ACI 408R-03, Bond and Development of Strength. 2003.
2. *Taber, L., Belarbi, A., Richardson, D.* Effect of Reinforcing Bar Contamination on Steel-Concrete Bond During Concrete Construction, International Concrete Abstracts Portal, v. 209, 2002.
3. CEB Model Code 90. 1992.
4. *Bogas, J., Gomes, M., Real, S.* Bonding of steel reinforcement in structural expanded clay lightweight aggregate concrete: The influence of failure mechanism and concrete composition, Construction and Building Materials, Volume 65, 29 August 2014, Pages 350–359, 2014.
5. *Eshafani, R., Kianoush, R., Lachemi, M.* Top bar effect of steel in self-consolidation Concrete, Cement & Concrete Composites 30, 2008.
6. *Петров, Б., Захариева, Р.* Изследване влиянието на различни параметри върху якостта на натиск на бетони, съдържащи рециклирани добавъчни материали от строителна керамика. Сб. докл. От XV Международна научна конференция ВСУ'2015, ISSN 1314-071X, стр. 345-370.
7. *Захариева, Р., Петров, Б.* Възможности за влагане на едър добавъчен материал от рециклирана керамика за направата на конструктивни бетони: модул на еластичност. Сб. докл. От XV Международна научна конференция ВСУ'2015, ISSN 1314-071X, стр. 371-376.
8. *Haskett, M., Oehlers, D. u Ali, M. Mohamed.* Local and global bond characteristics of steel reinforcing bars, Engineering Structures, Volume 30, Issue 2, February 2008, Pages 376–383, 2008.
9. *Guerra, M.* Anchorage of steel rebars to recycled aggregates concrete. Construction and Building Materials, 72 p.113–123, 2014.
10. *Dejian, S.* Experimental study of early-age bond behavior between high strength. Construction and Building Materials Volume 113, 15 June 2016, Pages 653–663, 2016.
11. *Torre-Casanova, A.* Confinement effects on the steel–concrete bond strength and pull-out failure. Engineering Fracture Mechanics, Volume 97, January 2013, Pages 92–104, 2013.

12. Sanchak, E., Simsek, O. The Bond Strength of Structural Lightweight Pumice Aggregate. International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, 2011.
13. Sanchak, E., Simsek, O., Apay, A. A comparative study on the bond performance between rebar and structural lightweight pumice concrete with/without admixture. International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(14), pp. 3437–3454, 2011.
14. Kamal, M. Bond strength of concrete containing different recycled coarse aggregates. Concrete research letters Vol. 6 (2) – June, 2015.
15. Campione, G. Steel–concrete bond in lightweight fiber reinforced concrete under monotonic and cyclic actions. Engineering Structures, Volume 27, Issue 6, May 2005, Pages 881–890, 2005.
16. Kim, S., Yun, H. Influence of recycled coarse aggregates on the bond behavior of deformed rebars in concrete, Engineering Structures; 48: 133–143, 2012.

STUDY ON REINFORCEMENT BARS ANCHORAGE IN CONCRETE CONTAINING RECYCLED CERAMIC AGGREGATE

B. Petrov¹, R. Zaharieva²

Keywords: *building ceramics waste, recycled aggregate, lightweight concrete, adhesion, bond strength, fracture energy*

ABSTRACT

Requirements for the increase of resource and energy efficiency in construction impose the recovery of construction and demolition waste. Building ceramics waste can be recycled as aggregate for production of lightweight structural and lightweight insulating concrete. The present article discusses the results of studies, dedicated to the bond strength between reinforcement bars and concrete, containing coarse recycled ceramic aggregate (RCA). The methodology for bond strength testing has been modified. The impact of several mix design parameters, including that of different RCA percentage, is presented. It has been established that the bond strength was slightly (up to 15%) reduced when the amount of RCA remained below 60% of the total quantity of coarse aggregate. The use of RCA, however, leads to a positive increase of the fracture energy, required for the complete bond breaking, because a part of the energy is dissipated in the shearing of RCA particles, while in conventional aggregate concrete the energy is mainly consumed for the fracture of the mortar matrix. It has been proved that it is feasible to apply RCA concrete in reinforced concrete structures despite of some peculiarities of this concrete.

¹ Boyan Petrov, Assist. Prof., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd. Sofia 1046, e-mail: petrov.uacg@gmail.com

² Roumiana Zaharieva, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: roumiana.zaharieva@gmail.com