

ПРИЛОЖЕНИЕ НА ПРОИЗВОДСТВЕНИ СТОМАНЕНИ ОТПАДЪЦИ В СПЕЦИАЛНИ ДИСПЕРСНОАРМИРАНИ БЕТОНИ

Магдалена Костадинова¹, Никола Ангелов², Румяна Захариева³

APPLICATION OF INDUSTRIAL STEEL WASTE IN SPECIAL DISPERSION (FIBER)-REINFORCED CONCRETE

Magdalena Kostadinova¹, Nikola Angelov², Roumiana Zaharieva³

Abstract:

SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) is a special class of fibre-reinforced concrete characterized by a high fibre content (5 to 30% by volume) and a high-viscosity (high strength) fine-grained matrix, which enables them to absorb a large amount of energy.

This publication analyses the possibility of using chips generated as waste during the production and processing of steel products as dispersed reinforcement. Comparative tests have been conducted on the physical and mechanical properties of two types of SIFCON - with conventional steel fibres and with steel waste lathe scraps (chips). The influence on the strength characteristics of several types of matrices on SIFCON has been studied.

Initial results show that both types of SIFCON have similar performance and behaviour under impact. Therefore, steel chips represent an alternative for achieving the desired properties of SIFCON with a reduced environmental footprint.

Keywords:

SIFCON, steel waste fibres, steel fibres, fibre – reinforced concrete

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Бетонът е основен строителен материал и един от най-използваните материали за изграждане за строителни конструкции [1]. С развитието на сторителното инженерство и увеличаването на мащаба на сградите и съоръженията, изискванията към

¹ Магдалена Костадинова, ас., инж., Строителни материали и изолации, Строителен факултет, УАСГ, София 1046, бул. Христо Смирненски № 1, mkostadinova_fce@uacg.bg

Magdalena Kostadinova, Senior Assist. Prof. Eng., Department Building Materials and Insulations, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 Hr. Smirnenski Blvd. Sofia 1046, mkostadinova_fce@uacg.bg

² Никола Ангелов, гл.ас. д-р инж., Масивни конструкции, Строителен факултет, УАСГ, София 1046, бул. Христо Смирненски № 1, niko_angel@abv.bg

Nikola Angelov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Department Reinforced Concrete Structures, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 Hr. Smirnenski Blvd. Sofia 1046, niko_angel@abv.bg

³ Румяна Захариева, доц. д-р инж., Строителни материали и изолации, Строителен факултет, УАСГ, София 1046, бул. Христо Смирненски № 1, zaharieva_fce@uacg.bg

Roumiana Zaharieva, Assoc. Prof. Dr. Eng., Department Building Materials and Insulations, Faculty of Structural Engineering, UACEG, 1 Hr. Smirnenski Blvd. Sofia 1046, zaharieva_fce@uacg.bg

експлоатационните показатели на бетона също нарастват. Това налага непрекъснатото му развитие и подобряване. Якостта и дълготрайността са сред основните предимства на бетона. Главните му недостатъци са малката якост на опън и крехкото разрушение. Едно от решенията за преодоляване на тези недостатъци е дисперсното армиране с високомодулни влакна, най-често - стоманени влакна. Те повишават както якостта на опън, така и дуктилността, и енергията на разрушение на композита [2].

От друга страна, влагането на влакна създава предизвикателства пред обработваемостта на смесите и по тази причина обикновено не надвишава 2% по обем [3]. През 80-те на XX век, в Института за инженерни изследвания в Ню Мексико, САЩ, *D. Lancard* за първи път разработва разновидност на дисперсноармираните бетони, наречена SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) [3, 4], като прилага различна концепция – вместо да се добавят влакна в бетонната смес, финозърнеста суспензия запълва празниците между влакната в скелет/мрежа, състояща се от 5% до 30% влакна. Суспензията от цимент, вода, силициев диоксид, много фин пясък и химически добавки (мошен суперпластификатор) осигурява висока якост на матрицата [5]. Технологията е следната: в кофражната форма се полагат хаотично големи количества влакна, а след това суспензията се излива върху фибрите, като проникването се осигурява с прилагане на вибрации [6, 7]. SIFCON има различни приложения, свързани с динамични въздействия, включително удар и взив - за направа на настилки, ремонт и укрепване на конструкции, които са изложени на ударни натоварвания и такива, които се изграждат за съхранение на взривни материали. Освен това, той се използва за производство на плочи, които ще бъдат положени на еластична почва (основа), където възниква необходимостта от повишена дуктилност [8]. Якостните свойства на SIFCON се променят в зависимост от количеството влакна и техните геометрични и механични свойства [9]. Съвременните предизвикателства са свързани с подобряване на матрицата и оптимизиране на свойствата на SIFCON, използвайки разнообразни видове влакна.

Тъй като влакната заемат голяма част от обема на SIFCON, те имат най-голям ефект върху икономическите параметри и екологичните показатели на SIFCON. Например, стоманените влакна се характеризират с много голяма енергоемкост (респективно, големи емисии на парникови газове) и ресурсоемкост, което налага търсенето на алтернативи. Като ефективна алтернатива се очертава замяната на стоманените влакна с отпадъци от металообработването с подобна структура на влакната – стоманени стружки. В предприятията за производство на елементи за метални конструкции се генерират големи количества стружки. Обикновено те се предават за скрап за по-нататъшно оползотворяване, което, обаче, отново е свързано с прилагане на енергоемки технологии.

Стружките са сравнително лесни за механично рециклиране, като единствената необходима обработка е рязането им до желан размер и, в някои случаи, тяхното обезмасляване. По втория казус се работи и вече са разработени и пуснати в продажба центрофужни инсталации (или центрофуги за стружки) за премахване на смазочно-охлаждащата течност от скрапа, достъпни са и на българския пазар [10]. Така че, влагането на стружките като дисперсна армировка, е по-добър начин за оползотворяване, отколкото предаването им за скрап. То е било прилагано и преди, но главно за повишаване на способността на бетона за радиационна защита [1].

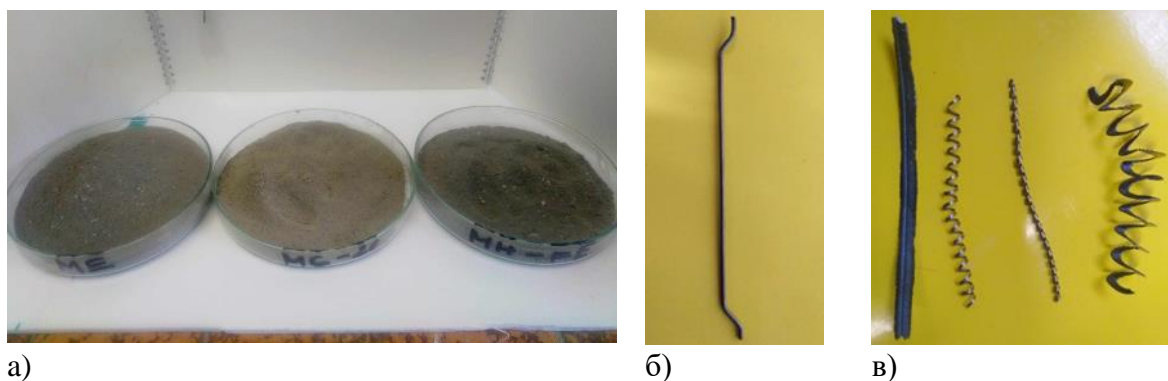
Настоящото изследване има за цел да установи дали е целесъобразно рециклирани влакна от отпадъчни стоманени стружки да бъдат използвани за замяна на стоманените влакна при направата на високоармирани дисперсни композити като SIFCON.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

2.1. Материали

Предвид приложението на SIFCON в конструкции, проектирани за динамични натоварвания от удар, взрив и земетресения, е необходимо да се използва високоякостна матрица. Тя се постига чрез високо съдържание на цимент, употреба на микросилициев прах, кварцов пясък с ограничена едрина на зърната и използване на високоефективни (поликарбоксилатни) суперпластификатори за втечняване на сместа. Дребнозърнестата матрица и високата ѝ пластичност гарантират проникването в празнините на структурата, създадена от влакната [11].

В настоящето изследване са използвани сухи смеси за високоякостни дребнозърнести разтвори на фирма Mapei България (фиг. 1а). В таблица 1 са посочени търговските наименования и някои технически характеристики на продуктите.



Фигура 1. Видове използвани материали: (а) високоякостни състави MAPEI, (б) стоманени влакна и (в) стоманени стружки

Таблица 1. Разтвори за матрица на SIFCON [12, 13, 14]

Вид разтвор	Клас на якост съобразно EN 1504-3	Максимален размер на пълнител (mm)	Якост на натиск (MPa)
Mapefill E	-	2,5	> 45
Mapegrout Calabile Ti 20	R4	2,5	> 45
Mapegrout Hi-Flow E	R4	2,5	> 45

За конвенционална дисперсна армировка от стоманени влакна са използвани такива с дължина 60mm, с куки в краищата (фиг. 1б). Физико-механичните характеристики на стоманените влакна са посочени в табл. 2.

Таблица 2. Характеристики на влакната

Вид влакна	Обемна		Дължина (mm)	Якост на опън	
	плътност (kg/m ³)	Форма		(MPa)	Модул (GPa)
стоманени фибри сружки от	7850	с куки спирали	60	1225	200
конструкционна стомана клас S235	7850	и пластини	60	360	200

Рециклираните стружки от стоманени отпадъци са генерирани от предприятие за производство на метални конструкции. В зависимост от формата, диаметъра на обработвания метал и операциите на машините с цифрово програмно управление, се получават различни видове по форма стружки. Така, сред рециклираните фибри има такива, които са пластинчати, получени при струговане на стандартна метрична резба на стоманени плътни кръгове, клас S235JR и други, които са спираловидни, нарязани с

дължина 60mm за целите на изследването (фиг. 1в). Не е прилаган друг вид обработка, например обезмасляване. За физико-механичните свойства на стружките (табл. 2) са приети тези за стомана клас S235JR. Основната разлика между конвенционалните стоманените влакна и рециклираните стоманени стружки се изразява в якостта на опън – тя е около 3,5 пъти по-ниска при стружките.

2.2. Състав на композита и изготвяне на пробни тела

В настоящето изследване са представени резултатите за три състава на матрицата на композита (ME, MC-20 и MH-FE), нерамирани (контролни) или армирани с 5% (по обем) от двата вида влакна – конвенционални стоманени (SF) или от отпадъци от стоманени стружки (SWF). Означението на различните композити SIFCON е представено в табл.3.

Таблица 3. Изследвани състави SIFCON

състав	дисп.		матрица	ω
	вид	%		
ME-0	-	-	Mapesfill E	0,145
ME-5SF	стом. фибри	5	Mapesfill E	0,145
ME-5WF	сружки	5	Mapesfill E	0,145
MC-20-0	-	-	Mapegrout Calabile Ti 20	0,16
MC-20-5SF	стом. фибри	5	Mapegrout Calabile Ti 20	0,16
MC-20-5SWF	сружки	5	Mapegrout Calabile Ti 20	0,16
MH-FE-0	-	-	Mapegrout Hi-Flow E	0,14
MH-FE-5SF	стом. фибри	5	Mapegrout Hi-Flow E	0,14
MH-FE-5SWF	сружки	5	Mapegrout Hi-Flow E	0,14

От всеки състав са изработени призматични пробни тела с размери, съобразени с изискванията на стандартите за различните изпитвания, представени в т. 2.3. Вътрешната повърхност на кофражните форми е третирана с кофражно масло, улесняващо декофрирането на бетона. Излишният обмазващ агент е отстранен чрез забърсване със суха кърпа непосредствено преди полагането на влакната в калъпите, като се цели да се предотврати омазняването на армировката, което може да доведе до лошо сцепление с матрицата при следващите етапи. Фибрите се дозират поотделно за всеки пробен образец и се полагат хаотично, без определена ориентация във формите, както е показано на фигура 2.



Фигура 2. Подготвена дисперсна армировка на SIFCON

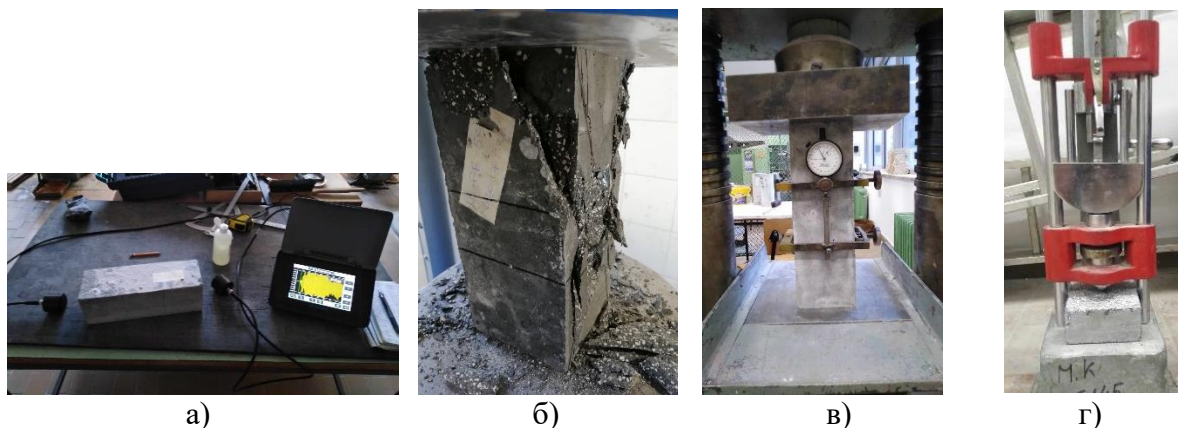
Така подготвените форми се запълват на пластове (послойно) с високоякостен разтвор, подготвен съгласно изискванията на фирмата производител. Водоциментното отношение (w), посочено в табл. 3., е съобразено с препоръките на производителя за получаването на течлива смес. Всеки пласт се уплътнява на вибрационна маса за по-добро проникване на суспензията във влакнестия скелет. Изготвените пробни образци се декофрират и отлежават под вода съгласно [15], до достигане на стандартна възраст за изпитване.

2.3. Лабораторни изпитвания

Проведени са изпитвания за определяне на обемната плътност, скоростта на разпространение на ултразвук, якостта на натиск, Е-модула и ударната жилавост, като целта е да се открият разликите в поведението на композитите, дължащи се на различната матрица и на вида на влакнестата армировка. Представените резултати са средноаритметична стойност от изпитванията на 3 пробни тела от всеки състав на композитите.

Обемната плътност е определена на 28-ми ден на изсушени до постоянна маса пробни образци. Размерите са измерени по стандартни методи посредством шублер, а масата е отчетена на везна с точност 0,1 g. За това изпитване се използват пробни образци с размери 100x100x400 mm. Определя се съгласно изискванията на [16].

Скоростта на разпространение на ултразвуков импулс дава информация както за плътността на материала, така и може да служи за определяне на негови деформационни характеристики, като начален (динамичен) Е-модул. Използван е уред PROCEQ Pundit PL-200. Изследвани са пробни образци с размери 100x100x400 mm, изсушени до постоянна маса, които са прозвучавани в надлъжна посока (фиг. 3а). Изпитването е проведено съгласно препоръките на [17].



Фигура 3. Лабораторни изпитвания на SIFCON

За якостта на натиск е проведено стандартно изпитване върху призматични пробни тела с размери 100x100x400 mm (фиг.3б). Използвана е хидравлична преса, чрез която се прилага статично натоварване със скорост $(0,6 \pm 0,2)$ МРа до пълното разрушаване на образеца, спазвайки стандартните изисквания [19].

Модулът на линейни еластични деформации (Е-модул) е определен съгласно методиката в [18]. Изпитвани са пробни образци с размери 100x100x400 mm, натоварени на натиск до 1/3 от якостта на натиск на матрицата. За измерване на деформациите са използвани часовникови деформометри с точност 0.001 mm. Те се разполагат в средната третина на две срещуположни страни на призмата, при база за измерване от 100 mm (фиг.3в).

Ударната жилавост се определя по нестандартизиран метод, като енергията за разрушение на единица обем от пробното тяло с размери 100x100x50mm, съгласно формула

$$R_{\text{imp}} = \frac{P \cdot (1+2+3+\dots+n)}{V_s} \quad (1)$$

където:

R_{imp} е ударната жилавост [J/cm^3],

P е теглото на чука, който се пуска върху пробното тяло [N], в случая 20N.

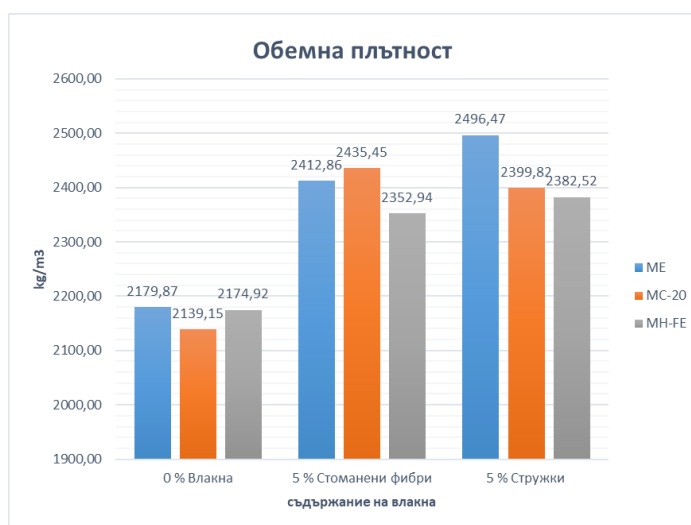
n е височината, при която пробното тяло се разрушава [cm],

V_s е обемът на изпитваното тяло [cm^3].

Първият удар е от височина 1cm, като всеки следващ удар е от височина, по-голяма от предходната с 1cm (фиг. 3г). Изпитването продължава до разрушаване на изпитваната проба.

4.РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

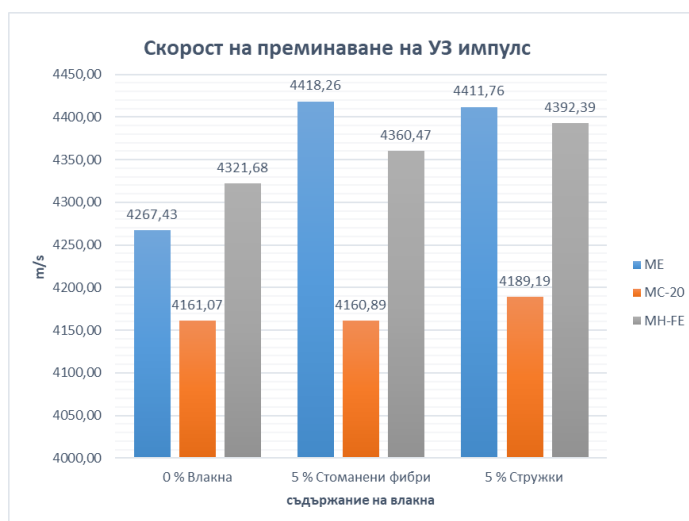
Тъй като и двата вида фибри са с една и съща обемна плътност $\rho_o=7850 \text{ kg}/\text{m}^3$, очаквано армираните пробни образци имат сравнително еднакви плътности (фиг. 4). Средното надвишение в резултатите за SIFCON е около 12% спрямо плътността на контролните състави (неармирана матрица), независимо от вида на влакната.



Фигура 4. Обемна плътност на контролните образци и композитите.

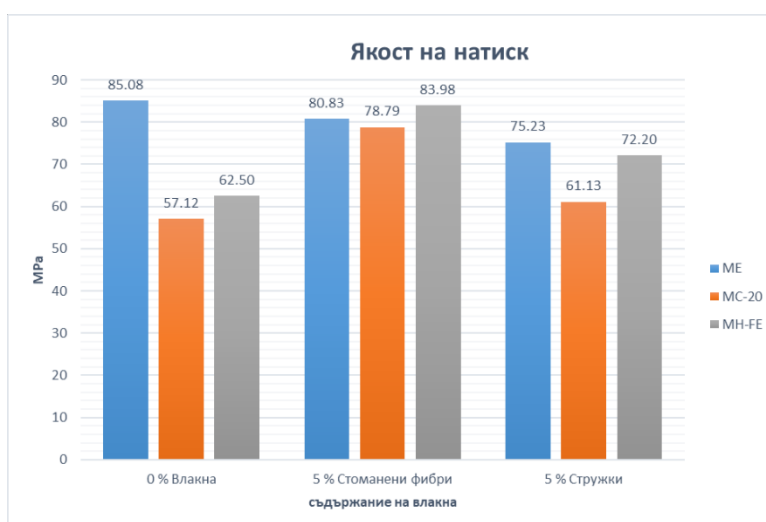
При състав MC-20 са отчетени най-ниските скорости за преминаване на ултразвуковия импулс (фиг. 5), което може да се дължи на по-еднородната му структура спрямо другите два състава на матрицата, а и неговата обемна плътност е относително пониска (фиг.4.). Това обаче не може да обясни защо, при влагането на 5% влакна или стружки, скоростта на разпространение на ултразвук също остава сравнително ниска при този състав. Този ефект би могъл да се дължи на по-неравномерно разпределение на влакната във финозърнестата матрица на MC-20, т.е. на дефекти в структурата. При останалите състави скоростта на разпространение на ултразвук нараства с въвеждането на влакната армировка и стружки, като ефектът е по-изразен при матрица ME, която се характеризира и с най-голяма обемна плътност (фиг. 4) и якост на натиск (фиг.6) –

нарастването на скоростта на ултразука спрямо контролния състав е 4% за SIFCON със стоманени влакна и 3% за SIFCON със стружки.



Фигура 5. Скорост за преминаване на ултразвуков (УЗ) импулс при контролните образци и композитите.

Въвеждането на влакна в матрицата има разнопочен ефект при различните композити – фиг. 6. Като цяло, якостта на натиск на SIFCON с конвенционални влакна е по-висока от тази на SIFCON със стружки. При състав MC-20 разликата в резултатие между двата вида дисперсна армировка е най-ясно изразена – стоманените влакна водят до 37% нарастване на якостта на натиск на MC-20-5SF в сравнение с тази на матрицата, а стружките – само със 7% (при MC-20-5SWF). При състав MH-FE тази разлика е доста по-малка – MH-FE-5SF има якост 34% по-висока от тази на матрицата, а MH-FE-5SWF – с около 16% (фиг.6).

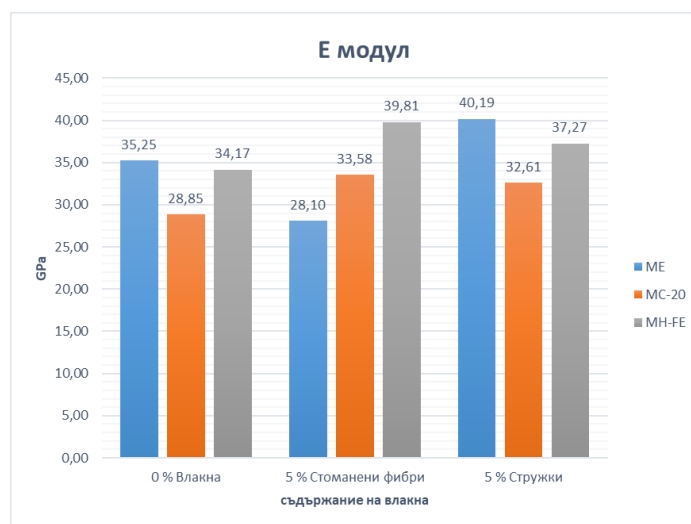


Фигура 6. Якост на натиск на контролните образци и композитите.

Изглежда, закотвянето на куките при конвенционалната дисперсна армировка води до по-добро сцепление и оттам – до по-ефективно поемане на вътрешните напрежения и премоставане на пукнатините в матрицата, резултиращи в по-висока якост на натиск. И при двата композита, обаче, при матрица ME се наблюдава понижаване на якостта в

сравнение с това на матрицата, по-изразено при SIFCON със стружки. Като причина може да се посочи отново възможното наличие на дефекти в структурата на композитите - каверни с въздух, неравномерно разпределение на влакната в обема, по-характерно при пластинчатите рециклирани стружки и др. Подобряването на технологията на изготвяне на образците би премахнало тези дефекти и би позволило по-ясно открояване на приноса на различните матрици върху якостта на натиск.

По отношение на Е-модула, най-високи резултати имат матриците ME и MH-FE (фиг. 7), които са разтворите с (относително) по-едрозърнест добавъчен материал. По-високият Е-модул, в сравнение с този на циментовия камък, на скалния материал на по-едрозърнестия пълнител, допринася за по-високия Е-модул на матрицата като цяло. Очакваният принос на стоманените влакна (с Е-модул от 200 GPa) в SIFCON е ясно изразен при матрици MC-20 и MH-FE, където Е-модулът на композитите е с около 15 % над този на съответната матрица. Понижението от 20% при матрица ME е нелогично и вероятно се дължи на дефекти в структурата на композита. Влагането на рециклирани влакна от стружки води до увеличение за всички състави, в рамките на 9-14% (фиг.7).



Фигура 7. Е-модул на контролните образци и композитите.

Ударната жилавост е показателят, който демонстрира най-добре предимствата на SIFCON. Независимо от характеристиките на матрицата, ударната жилавост на композитите е от 3,5 до 26 пъти по-висока от тази на контролните образци (фиг.8.). Стоманените фибри изграждат по-добри и плътни „таралежи“ при полагането във формата, поради което енергията за разрушение на съставите с 5% конвенционални влакна е относително по-голяма от тази на композитите със стружки. При последните обаче, ударната жилавост е също много висока – до 20 пъти (за състав MC-20-5%SWF), в сравнение с тази на матрицата – фиг. 8.



Фигура 8. Ударна жилавост състави SIFCON

5. ИЗВОДИ И НАСОКИ ЗА БЪДЕЩИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Резултатите от настоящето изследване показват, че използването на отпадъчни стоманени стружки за високоармирани дисперсно бетони е алтернатива на традиционното използване на стоманени влакна, макар че композитите с рециклираните влакна имат по-ниски показатели. Въпреки това, предвид високата ударна жилавост на съставите със стоманени стружки, те са подходящи именно за направата на SIFCON, тъй като той се използва основно за направата на конструкции, устойчиви на ударни и други динамични въздействия. Струговането е процес, осигуряващ различен вид отпадък, в зависимост от операцията, която се извършва. По тази причина се предвижда провеждането на по-задълбочен анализ върху влиянието на дължината и формата на влакната от стружки върху поведението на SIFCON. Необходимо е да се подобри и технологията на изготвяне на пробните образци и да се разгледа влиянието на мащабния фактор.

За оценка на цялостния ефект от замяната на стоманените влакна със стоманени стружки би следвало да се анализира и ефектът от замяната върху икономическите и екологичните показатели на SIFCON.

От друга страна, изискването за използване на висококачествена матрица за SIFCON, води до използването на голямо количество цимент, а циментовата промишленост генерира големи количества CO₂ [21]. Следователно, търсенето на алтернативни свързващи вещества за частична замяна на цимента, например бетонова пудра от рециклирани строителни отпадъци [20], е друго направление за оптимизация на съставите на SIFCON.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящата публикация отразява научно-изследователската 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. Авторите благодарят за предоставеното финансиране по проекта.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Николов И. и др., Строителни материали, учебник за студентите по специалността архитектура от Висшия институт по архитектура и строителство, Издателство ВИАС, София, 1989г.

- [2] Ipek M, Yılmaz K, Uysal M. The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase. *Constr Build Mater* 2012;26:459–65
- [3] Lankard, D.R. Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON): Properties and Applications. *MRS Online Proceedings Library* 42, 277–286 (1984). <https://doi.org/10.1557/PROC-42-277>.
- [4] Lankard DR, Newell JK. Preparation of highly reinforced steel fiber reinforced concrete composites. In: *Fiber reinforced concrete–international symposium, ACI SP-81*, American Concrete Institute, Detroit, 1984. p. 287–306
- [5] Wang ML. Constitutive properties of SIFCON. In: *Proceeding, workshop on fibre reinforced cement and concrete, Sheffield, July 28–30; 1994*. p. 237–255
- [6] Wang ML, Maji AK. *Shear properties of slurry infiltrated fiber concrete (SIFCON)*. London: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites; 1992. p. 203–212.
- [7] Tabak V. Çelik Lifli Betonda Lif ve Lif Boy/Çap Oranlarının Deg̃iş iminin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2004. p. 73–76.
- [8] Tuyan M, Yazıcı H. Pull-out behavior of single steel fiber from SIFCON matrix. *Constr Build Mater* 2012;1:571–7
- [9] Yan A, Wu K, Zhang X. A quantitative study on the surface crack pattern of concrete with high concent of steel fiber. *Cem Concr Res* 2002;32:1371–5
- [10] <https://инженер.bg/mashini/discussions/ds-lanner>, последно посетен на 23.10.23г.
- [11] Moneem N, Kubba H., Ali Zeini H, Investigation of the Behavior of Slurry Infiltrated Fibrous Concrete, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 65, Issue 1 (2020) 109-120
- [12] <https://www.mapei.com/bg/bg/produkti-i-resheniya/spisak-s-produkti/podrobnosti-za-produkta/mapefill-e>, последно посетен на 23.10.23г.
- [13] <https://www.mapei.com/bg/bg/produkti-i-resheniya/spisak-s-produkti/podrobnosti-za-produkta/mapegROUT-colabile-ti-20>, последно посетен на 23.10.23г.
- [14] <https://www.mapei.com/bg/bg/produkti-i-resheniya/spisak-s-produkti/podrobnosti-za-produkta/mapegROUT-hi-flow-e>, последно посетен на 23.10.23г.
- [15] БДС EN 12390-2:2019 Изпитване на втвърден бетон. Част 2: Приготвяне и отлежаване на пробни тела за изпитване на якост
- [16] БДС EN 12390-7:2019 Изпитване на втвърден бетон. Част 7: Плътност на втвърден бетон
- [17] БДС EN 12504-4:2021 Изпитване на бетон в конструкции. Част 4: Определяне на скоростта на разпространение на ултразвуков импулс
- [18] БДС EN 12390-13:2021 Изпитване на втвърден бетон. Част 13: Определяне на секантния модул на еластичност при натиск
- [19] БДС EN 12390-3:2019 Изпитване на втвърден бетон. Част 3: Якост на натиск на пробни тела
- [20] БДС EN 197-6:2023 Цимент. Част 6: Цимент с рециклирани строителни материали
- [21] Tsakalakis K., Scrap tyres management in the EU cement industry – an economic/ environmental approach, *ZKG INTERNATIONAL*, No. 4-2007 (Volume 60)