



DOI: [10.71167/uacceg.2026.590111](https://doi.org/10.71167/uacceg.2026.590111)

Получена: 09.11.2025 г.

Приета: 18.12.2025 г.

САМОДИАГНОСТИЦИРАЩИ СЕ БЕТОНИ – СЪСТАВ, ИЗПЪЛНЕНИЕ, СФЕРИ НА ПРИЛОЖЕНИЕ

Б. Петров¹

Ключови думи: самодиагностициращ се бетон, функционални пълнители, диспергиращи материали, сензорни свойства

РЕЗЮМЕ

В статията се анализират основните принципи за проектиране и изпълнение на самодиагностициращи се бетони (Intrinsic Self-Sensing Concrete) (ISSC). Оценени са съществените изисквания към състава и технологията за производство на този бетон. Прогнозирани са стойностите на прага на чувствителност при различни функционални пълнители и са направени препоръки за подходящите методи за хомогенизиране на компонентите в бетонната смес. Анализирани са сензорни свойства на ISSC, както и влиянието на различни фактори, водещи към подобряване на сензитивността на бетона. Представени са възможностите за приложение на този тип бетони у нас.

1. Въведение

Значителен брой бетонни конструкции са изложени на въздействието на променящи се по вид и степен на агресивност корозионни среди, включително химични и физични агенти, температура и др. Бетонът е подложен на стареене, пукнатинообразуване и други разрушителни процеси. В тези експлоатационни условия безопасността и дълготрайността на бетона трябва да бъдат надеждно и дълготрайно гарантирани. За осъществяване на постоянен конструктивен мониторинг се използват тензометрични датчици, сензори с оптични влакна, пиезокерамични преобразуватели, както и пиезоелектрични сензори. Тези повърхностни сензори имат относително ниска цена,

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

лесно се монтират и настройват, имат добра повтораемост, но техните компоненти могат да бъдат повлияни от външно електромагнитно поле и отчитат само локални промени в конструкцията. Тяхното инсталиране в големи строителни конструкции води до значителни разходи, а прикрепването към елементите е несигурно и се влияе от климатичните промени и прояви на вандализъм. Вградените сензори могат да доведат до потенциални проблеми с безопасността поради появяващите се хетерогенни процеси в структурата на бетона. Всичко това води до увеличаване на дългосрочните разходи за поддръжка при осъществяване на мониторинг на съоръженията [1, 2].

Самодиагностициращият се бетон (ISSC) успешно съчетава конвенционалната матрица на бетона с електропроводим функционален пълнител, което му позволява да реализира определени сензорни функции. Чрез перманентно измерване на промяната на електрическите свойства на композита се осъществява контрол на изменението на напрежението, деформацията и настъпващите деградационни процеси в материала.

Следователно, ISSC предоставя нова възможност за оценка на безопасността и дълготрайността на конструкцията по време на нейния експлоатационен живот, за да се гарантира нейната годност, устойчивост и дълготрайност. Все по успешно се използва в системите за конструктивен мониторинг на високи сгради, мостове, тунели, високоскоростни железопътни линии, нефтени платформи, язовири, атомни електроцентрали и др.

Бетонната матрица е електронепроводящ материал, електрическото поведение на ISSC се доминира от пълнителя. ISSC постига своите функции чрез пиезорезистивен ефект на функционалния пълнител, хомогенно диспергиран в матричния материал. Тези, силно чувствителни спрямо електричеството, частици се разпределят равномерно в матрицата, образувайки зависима от концентрацията на пълнителя проводима мрежа. Функционалният пълнител (въглеродни влакна, стоманени влакна, въглеродни нанотръби, никелов прах и др.) същевременно запазва или дори подобрява механичните характеристики на втвърдения бетон чрез ефекта на дисперсното армиране.

Конвенционалният бетон, включващ добавъчни материали и циментно пясъчен разтвор, служи като структурно свързващ компонент без или със слаба сензорна способност. Поради йонния си състав циментовата матрица благоприятства сензорните свойства на ISSC.

Функционалният пълнител (FF) определя самодиагностициращите свойства на композита. За целта той трябва да бъдат добре диспергиран (разпределен) в бетонната матрица, за да образуват обширна проводима мрежа. При натоварване и деформиране на бетона проводимата мрежа вътре в материала се променя, което влияе върху електрическите параметри на материала (напр. електрическо съпротивление, капацитет и импеданс). Следователно, деформацията (или напрежението), напукването и повредите при статични и динамични условия могат да бъдат открити чрез измерване на електрическите параметри [3]. ISSC се използват при статично и при динамично натоварване.

Предимствата на ISSC са висока чувствителност, дълъг експлоатационен живот, отлична съвместимост, издръжливост и механична якост, както и ниски разходи за поддръжка, като може да се приложи в мониторинга на конструкциите за установяване тяхното състояние, интензивността на трафика, управлението на паркирането и много други области.

Въпреки че първоначалната цена на ISSC е по-висока от тази на традиционния бетон, последващите разходи за поддръжка са сериозно редуцирани. През последните две десетилетия бяха положени много усилия за развитието на ISSC и са разработени различни иновации в областта на неговото дефиниране, проектиране на състава, производство, измерване, сензорни свойства, генериращ механизъм на чувствителността и конструктивни приложения. Напредъкът в областта на нанотехнологиите води до

развитието на наномасабни влакна, което прави възможно развитието на нови многофункционални, високоефективни, усъвършенствани чувствителни наноконкомпозитни материали на циментова основа, които могат ефективно да действат като сензори за наблюдение на състоянието на конструкцията [4].

ISSC е структурен материал, който диагностицира себе си без необходимост от вградени, прикрепени или отдалечени сензори. За подобряване на безопасността и дълготрайността на съоръженията, както и за проектирането на сгради, става все по-важно и по-необходимо прилагането на ISSC, а конструктивният мониторинг се очертава като жизненоважна алтернатива. Конструктивният мониторинг налага инсталиране на сензори в конструкцията, които да идентифицират признаци на структурно влошаване и повреди. Ранното диагностициране на бетонните конструкции е от решаващо значение за минимизиране на разходите за техния ремонт и възстановяване. Интелигентният бетон може да осигури подкрепа за изграждането на подобни интелигентни сгради и съоръжения. Съвременните ISSC с наномасабни пълнители имат много по-стабилно и по-надеждно сензорно поведение от това на бетон с микромасабни пълнители [5]. Коефициентите на чувствителност на амплитудата на изменението на електрическото съпротивление и електрическото напрежение са факторите, които характеризират важната чувствителност (сензитивност) на бетона [6]. Циментовите композити предоставят изключително сериозен потенциал за разработване на такива многофункционални материали за мониторинг на инфраструктурните системи. Бъдещите проучвания ще се фокусират върху отчитане на въздействието на факторите на околната среда, изследване на промяната на съпротивлението при циклични натоварвания и характеризиране на връзката между промените на остатъчната проводимост и остатъчните деформации след разтоварване [7]. Навлиза нов подход за създаване на проводящ и самодиагностициращ се бетон, на базата на тънкослойни покрития на добавъчни материали. Този метод позволява по-евтино и по-надеждно разпръскване на електропроводимите компоненти във вид на грубо и фино покритие върху добавъчните материали [8]. В [9, 10] е разгледана взаимовръзката между самодиагностициращите се и самовъзстановяващите се бетони. Инспекцията е изчерпателен процес, който изисква многобройни часове упорита работа без пълни гаранции за успеваемост, което налага търсенето на по-ефективни съвременни възможности [11]. Съществуват и определени предизвикателства в прилагането на ISSC, които трябва да се отстранят [12, 13]. Сензорният бетон, клон на интелигентния бетон, се отнася до бетонни материали и конструкции, притежаващи свойства да усещат различни физични и химични параметри, свързани със структурната цялост, дълготрайност и надеждност в обобщен смисъл [15].

Основната цел на изследването е оптимизиране на изискванията към състава и технологията за производство, с цел трайно редуциране на електрическото съпротивление на бетона и повишаване на неговата чувствителност, като сензорен елемент в системата на конструктивен мониторинг.

2. Състав и структура на ISSC

Съставът на ISSC определя неговата структура, чувствителност и надеждност на сензорните свойства. На макроскопско ниво ISSC се състои от матричен материал, функционален пълнител (FF) и диспергиращ материал. На микроскопско ниво съществува допълнителна фаза, изследвана като интерфейсна фаза или фаза на контактната зона. Структурата на ISSC обхваща над 10 порядъка по размер, вариращи от нанометри (продукти на хидратацията) до микрометри (интерфейсна фаза), както и от милиметри (FF), до десетки метри (конструктивен елемент).

2.1. Матрица

Всички видове бетон могат да се използват като матрица на ISSC. Матрицата включва циментов камък и минерални добавъчни материали. Матрицата притежава незначителна електропроводимост, респективно на нея липсва чувствителност. Чрез нея обаче се реализират механичните натоварвания и деформации, при което се променят обемът и напречните размери на елемента, водещо до промяна на електрическото съпротивление. Основната функция на бетонната матрица е надеждно да обединява FF. Видовете компоненти на матрицата и пропорциите им на смесване, наличието на различни химически добавки за бетон, водоциментовото отношение, количеството на добавъчните материали и техният зърнометричен състав регулират дисперсията на т.нар. функционални пълнители и механичните свойства на бетона. По този начин матрицата косвено влияе върху електрочувствителността на ISSC. В момента за ISSC се използват матрици с ниско водоциментово отношение, плътна микроструктура, оптимизиран състав и подбрани видове цимент, което подобрява съвместната работа на пълнителите [12, 13]. Пропорцията и проектирането на състава влияят върху разпределението и дисперсията на пълнителите, като по този начин влияят върху общата сензорна способност на бетона и неговата чувствителност при измерване на електрическите характеристики.

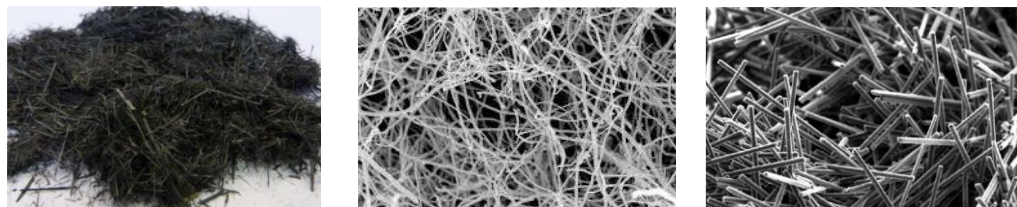
2.2. Функционални пълнители (FF)

FF е най-чувствителната компонента в състава на ISSC. Известни са повече от 10 вида FF, класифицирани като единични и хибридни. Тези компоненти образуват електропроводима мрежа в бетона. Съществуват три нива на разпределение на FF в ISSC: разпределение в свързващото вещество, разпределение на свързващото вещество с FF сред пясъка и разпределение на пясъка със свързващо вещество, както и FF сред едрия добавъчен материал [11]. Концепцията за ISSC се основава на принципа на пиезорезистивността и промените на електрическото съпротивление на електропроводимия бетон. Деформацията и повредите нарушават или уплътняват проводимата мрежа, което води до промяна в електрическите параметри. Всички тези проводими компоненти осигуряват път за протичане на тока заедно с циментовата матрица, като по този начин образуват електрическа мрежа [13 – 15].

2.2.1. Единични функционални пълнители

Въглеродът е най-рентабилният електропроводим елемент. ISSC най-често се произвеждат с въглеродни влакна (CF), полимери, усилени с въглеродни частици (CP), или хибридни композити, съдържащи араמידни/въглеродни или стъкло/въглеродни влакна.

Карбонови влакна или фибри (CF) – най-често използваният вид пълнител за производство на ISSC. Диаметърът варира от 0,005 до 0,010 mm. Тези фибри имат висока якост на опън, съизмерима със стоманените влакна (SF), химическа стабилност, по-висока от стъклените влакна, и устойчивост на размерите. CF са с ниска плътност и много високо съотношение якост/плътност. Притежават висока електропроводимост. Те подобряват жилавостта, устойчивостта на умора, якостта на опън и огъване, намаляват пълзенето и съсъхването, увеличават модула на еластичност, подобряват пукнатиноустойчивостта на матрицата. Структурата е подобна на графита, но якостта на опън е по-висока. Състоят се от отделни ламели на въглеродните атоми. Различаваме къси и дълги влакна, като за ISSC се използват къси CF за по-добро разпределение в циментовата матрица. CF служат за диагностициране на еластични и пластични деформации на бетона, уморно поведение, ударно напрежение. Прилагат се от 1993 г. Тези фибри са инертни и не взаимодействат с цимента и водата.



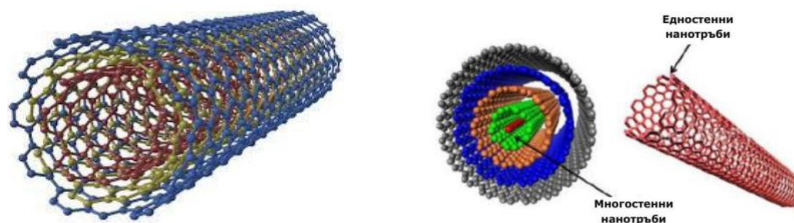
Фиг. 1. Карбонови фибри и влакна

Графитни сажди (CB) – характеризират се с ниска плътност, висока химическа и термична стабилност, придават висока чувствителност на бетона. За ISSC се изследват сажди с диаметър 30 nm и концентрация до 1 % от 2000 г. Състоят се от сферични въглеродни частици и малка специфична повърхност. Използват се и като пълнител на полимерите. Проучвана е комбинацията CF+CB, при която CB са използвани като фин пълнител между CF за повишаване на чувствителността.



Фиг. 2. Графитни сажди [8]

Карбонови нанотръбички (CNT) – структурата им е с кухини, което води до ниска плътност. Улесняват оформянето на проводяща и механично здрава армировъчна мрежа на вътрешната матрица с ниско ниво на концентрация на CNT (0,05 тегл. %) Подобряват атомната структура на бетона и микромеханиката на циментовия камък, като променят микроструктурата на калциевите хидросиликати (CSH).



Фиг. 3. Карбонови нанотръбички [8]

CNT се получават от навити графитни листове. Биват едностенни (SW CNT), които водят до по-висока якост на опън и модул на еластичност, но са по-скъпи, и многостенни (MW CNT), които са по-евтини и по-лесно достъпни.

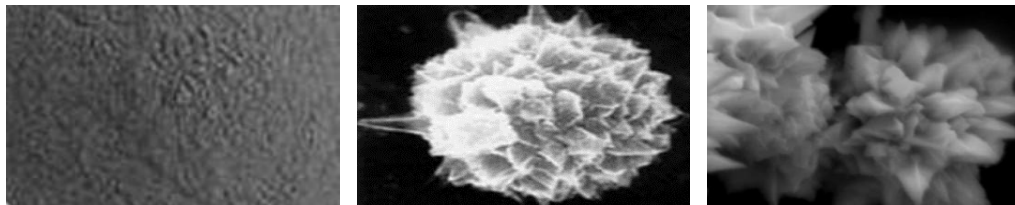
Карбонови нанофибри (CNF) – това е наномасшабен квазиедномерен карбонов материал с незначителен диаметър. Диаметърът варира между този на нанотръбичките и карбоновите фибри.

Стоманени фибри (SF) – добър ефект при ниска стойност.

Стоманена шлака (SS) – съдържа железни оксиди, чието електрическо съпротивление и електропроводимост са идентични с карбоновите фибри (CF). (SS) може

да се използва като добавъчен материали в бетона, заместващ естествените добавъчни материали, което я прави обещаващ функционален пълнител.

Никелов прах (NP) – притежава отлична електропроводимост, добра корозионна устойчивост и високи механични свойства. Никеловият нанопрах притежава остър нановръх, което придава на ISSC най-високата чувствителност от посочените пълнители.



Фиг. 4. Никелов прах

Самодиагностициращият се ефект зависи от вида на функционалния пълнител, от неговата морфология (форма, размер, дължина, състояние на повърхността, степен на агрегиране, агломерация) и от концентрацията му в циментовата матрица. Например влакнестите пълнители с ефективна концентрация 1 % повишават чувствителността на бетона при по-ниска концентрация в сравнение с праховите с ефективна концентрация 5 %. Но влакнестите се разпръскват по-трудно и лесно се повреждат по време на бъркане.

Таблица 1. Видове функционални пълнители [15]

Класификация		Типичен функционален пълнител
Критерии	Категория	
Компоненти	въглеродни метали или метален прах	CF, CNT, CNF, CB GP, SF, NP, Nano TiO ₂ и Fe ₂ O ₃
Вид на пълнителя	фибри прах	CF, SF, CNF, CNT, CB, GP, NP
Мащаб	макроскала микроскала наноскала	SF, SS CF, GP, NP CNF, CNT, GP, TiO ₂ , Fe ₂ O ₃
Проводимост	електропроводими полупроводникови непроводими	CF, SF, CNF, CB, NP Nano TiO ₂ Nano Fe ₂ O ₃ , SS, MFA PVAF
Вид на приложение	самостоятелно хибрид фибри фибри и прах прах	CF, CNT, CB, SS, NP CF+CNT, Помеднени CF+SF, PVAF+CF, PVAF+SF CF+CB, CF+GP, SF+GP, CNT+CB, PVAF+CB, CB+NP, MFA+SS
Състояние на повърхността	нормална модифицирана	CF третиран с озон, със сол или с HNO ₃ CNT, CF обмазани с въглерод полим. нишки, помеднени CF, хидроксилни CNT

2.2.2. Хибридни функционални пълнители

В последните години се използват нови хибридни пълнители като комбинация на различни FF. Сензорите с хибридният пълнител показват по-добра повторямост и чувствителност в сравнение със сензорите, съдържащи само CF. Например комбинация от CNT/CNF увеличава якостта на опън 20 пъти, а модула на еластичността 10 пъти, сравнено с CF. Повишава се вътрешната адхезия в матрицата. Остатъчната деформация

при разрушение е 18 пъти по-висока от тази на CF. Висока пластичност и отлична електропроводимост. Структурата на CNT е с кухини, което води до ниска плътност на хибрида. Улесняват оформянето на проводяща и механично здрава армировъчна мрежа на вътрешна матрица с ниско ниво на концентрация на CNT (0,05 тегл. %). CNT/CNF притежава интересни сензорни свойства. Електрическите свойства се променят линейно и обратимо с промяна на отношението напрежение/деформация. Усилията в момента са насочени към изследване с наномасабни карбонови фибри CNF.

Таблица 2. Хибридни функционални пълнители

Хибридни пълнители	Параметри на самодиагностициране	Сравнение с пълнител
Карбонови фибри (CF) и Карбонови нанотръби (CNT)	надеждност чувствителност	самостоятелно CF
Стоманени фибри (SS) и Магнитна летяща пепел (MFA)	чувствителност	самостоятелно SS или MFA
Карбонови фибри (CF) и Черен графит (CB)	възпроизводимост сензорна	самостоятелно CF
Карбонови нанотръби (CNT) и Карбонови фибри (CF)	повторяемост стабилност	самостоятелно CF
Карбонови нанотръби (CNT) и Карбонови фибри (CF)	чувствителност стабилна проводимост	самостоятелно CNT
Карбонови фибри (CF) и Графитен прах (GP)	чувствителност	самостоятелно CF
Проводящо желязо и Карбонови фибри (CF)	чувствителност	самостоятелно CF
Фибри от поливинил алкохол (PVAF) и Карбонови фибри (CF)	фоново съпротивление чувствителност	самостоятелно PVAF

Проводимостта зависи от обемната концентрация на FF. Обикновено увеличаването на съпротивлението се дължи на образуване или разпространение на пукнатини, а намаляването на съпротивлението се дължи на затваряне на пукнатини.

Структурата на ISSC с хибридни FF е силно хетерогенна, сложна и динамична. Сензорните свойства на ISSC са тясно свързани с разпределението на FF в бетонната матрица, интерфейлната фаза, както и кухините и течните фази в матрицата. Интерфейсните зони влияят на електрическия контакт между пълнителите и бетонната матрица и между пълнителите [11].

2.3. Диспергиращи материали

ISSC е многокомпонентна композитна система със сложни термодинамични и динамични характеристики. Необходима е ефективна технология за обработка, за да се включи всеки компонентен материал в композита, за да се образува бетон с желаната структура и свойства. Тази група материали са полезни за диспергиране и правилно хомогенизиране на FF в матрицата. При производството на ISSC диспергиращият материал благоприятства смесването, като прави мрежата по-чувствителна.

FF са фини пълнители на микро- и нанониво. С увеличаване на дисперсността нараства специфичната повърхнина и величината на контактните сили. Повишава се опасността от образуване на гнезда. Това определя необходимостта от специални диспергиращи материали, които да формират матрицата в дисперсионно отношение и да подобрят хомогенността. Използването на диспергиращите материали има две цели –

стабилно разпределение на компонентите и подобряване на механичните свойства, дори при намалена концентрация на FF. Идеалният диспергиращ материал трябва да бъде ефективен и съвместим с матрицата (да не влошава хидратацията на цимента и да не редуцира механичните характеристики на бетона).

Диспергиращите материали са три вида:

- повърхностно активни вещества – подобряват омекването, електростатичното отблъскване и намаляват препятствията при движение;
- минерални добавки – чрез сепарационни ефекти диспергират системата;
- комбинирани материали.

Диспергиращите материали, използвани най-често, са показани в табл. 3.

Таблица 3. Диспергиращи вещества

Категория	Диспергиращи компоненти	Функционален пълнител
Повърхностно активни вещества	водонамаляващи добавки	CF, CNT, CNF, CB, GP, NP, Nano Fe ₂ O ₃
	метилцелулоза (MC)	CF, CNT
	карбоксилати	CF
	хидроксипропил	
	натриев додецил сулфат	CNT, CNF
	натриев додецил бензен сулфонат (SDBS)	CNT
	SDBS+полиакрилова киселина	
Минерални добавки	микросилициев прах	CF, CB, SF, NP
	летяща пепел	SS, MFA

Диспергирането на наномасштабни FF се получава и чрез ултразвукова обработка и добавка против разпенване. Микромасштабните пълнители (CF) се диспергират основно с помощта на минерални добавки. Ефектът на диспергиращите компоненти зависи от концентрацията, състава на бетона, реологичните свойства и ефективното разпръскване.

Техниката на диспергиране е все още в начален стадий на развитие. Диспергиращите методи трябва да се оптимизират чрез допълнително проучване.

Условията на околната среда също дестабилизируют електрическите свойства на ISSC и намаляват точността на измерване, като влошават диспергирането.

Изборът на съставни материали и техните пропорции на смесване са от решаващо значение при производството на ISSC [17].

2.4. Пропорции между отделните компоненти

При проектиране на състава на ISSC се определят основните компоненти и съотношението между тях. Принципите за проектиране на състава се основават на принципите за проектиране на състав на конвенционални бетони, като се прилага познатият метод на плътните обеми. При проектирането трябва да се отчете фактът, че FF променя специфичната повърхнина на сместа и съществено влияе върху реологичните свойства на бетонната смес. Диспергиращите материали оказват влияние върху времето за запазване на обработваемостта на сместа, както и върху стойността на основните механични характеристики на втвърдения бетон.

Подходящото съотношение между компонентите се постига чрез внимателно комбиниране на традиционните изчислителни методи и последващия експериментален етап. Влиянията на компонентите са твърде сложни и се нуждаят от задълбочена поредица от лабораторни изпитвания. В конкретния случай се търси оптимален баланс между обработваемост на бетонната смес, механични характеристики на втвърдения бетон и ефективни сензорни свойства на готовия композит.

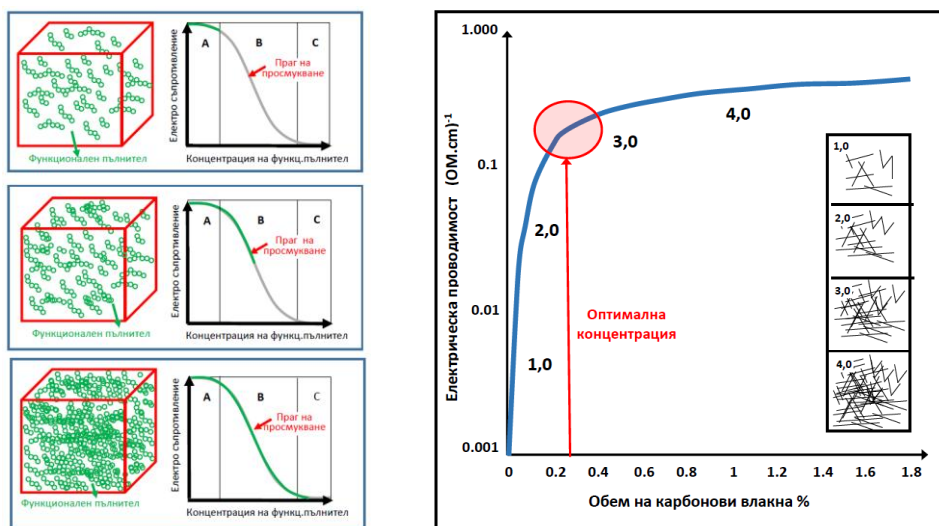
ISSC е сложна многокомпонентна система с интересни термодинамични и динамични характеристики. Това изисква ефективна технология за производство и влагане на компонентите до получаване на композит със стабилни и възпроизводими свойства. ISSC е с многокомпонентна, многофазна и многомащабна структура, което налага да се подобри повторемостта и стабилността на измерването. Микро- или наномасщабните FF, особено за влакнестите пълнители, са склонни към заплитане и агломерирание, което превръща тяхното разплитане в бетона в критичен проблем. Физическите методи за разплитане (т.е. високоскоростно срязване или ултразвуково разплитане), химичните методи за разплитане (т.е. повърхностно активно вещество или диспергатор) и комбинацията от тях се проучва интензивно за решаване на този проблем. Подходящият метод за разплитане не само увеличава електропроводимостта, но подобрява якостта и дълготрайността на композита [11].

2.5. Механизъм на диагностициране и критерии за чувствителност

Проводимостта и съпротивлението на модифицираната матрица зависят от обемното разпределение с участието на FF. При ниска концентрация контактът между съседни влакна е нарушен. С увеличаване на количеството на проводящите частици съседните клъстери влизат в контакт и образуват проводяща мрежа през цялата матрица. На фиг. 5 са посочени трите характерни зони на изменение на зависимостта между проводимостта и дела на функционалния пълнител:

- *Зона А* – трудно се формират електропроводими пътеки в композита. Промяната на капацитета е доминиращият фактор. *Композитът не е чувствителен.*
- *Зона В* – в началото промяната на капацитета, промяната на вътрешното съпротивление и промяната на свързването между FF и матрицата са доминиращите фактори. С увеличаване на концентрацията, и особено в края на зона В, водещи фактори стават промяната на разстоянието или тунелирането между FF, промяната на контакта между FF, промяната на свързването с матрицата и промяната на присъщата устойчивост на пълнителите. *Чувствителността на композита е по-висока.*
- *Зона С* – промяната на контакта между FF и промяната на присъщата устойчивост на пълнителите стават доминиращи фактори. Проводимата мрежа вътре в композита се стабилизира. *Чувствителността е висока.*

Когато концентрацията на тези проводими частици в матрицата достигне критична стойност, увеличението на проводимостта става незначително. Тази критична стойност се нарича праг на чувствителност (праг на проникване) и дава баланса между висока сензитивност на бетона, ниска концентрация на пълнителя и ниско електрическо съпротивление. Съществува критичен състав, след който проводимостта се увеличава няколко порядъка. Тази критична стойност е основен параметър за проектиране и оптимизиране на чувствителността на ISSC. Концентрация на пълнителя над прага на проникване подобрява чувствителността при опънно натоварване, а под този праг – при натискови натоварвания.



Фиг. 5. Праг на чувствителност [3, 8, 18]

Видовете електрическа проводимост на ISSC в зависимост от вида на елементарните частици са електронна и йонна проводимост. Електроните се доставят от проводимия FF, докато йоните се доставят от циментовата матрица. Електронната проводимост е ефективна при пълнители, съдържащи въглерод. Двата типа проводимости са свързани помежду си. Когато йонната проводимост е доминираща, електрическото съпротивление се увеличава с времето поради ефекта на поляризация. Когато електронната проводимост е доминираща, електрическото съпротивление се запазва стабилно във времето.

В зависимост от разстоянието между отделните функционални пълнители съществуват три типа електрическа проводимост [11].

- *Контактна проводимост* – осъществява се в резултат на директен контакт между частиците на FF. По този начин се формира проводима връзка.
- *Тунелна проводимост и/или проводимост на полюси емисии* – осъществява се, когато разстоянието между FF е по-малко от 10 nm. Тази проводимост е индуцирана от локално електрическо поле, а пълнители с уникална морфология (NP, CNT) предизвикват локално нарастване при върховете.
- *Йонна проводимост* – водата в хидратираната циментова паста разтваря йони (главно калциеви и хидроксилни), което води до йонна проводимост през свързаните капиларни пори. Изсушеният циментов камък е изолатор и не притежава проводимост.

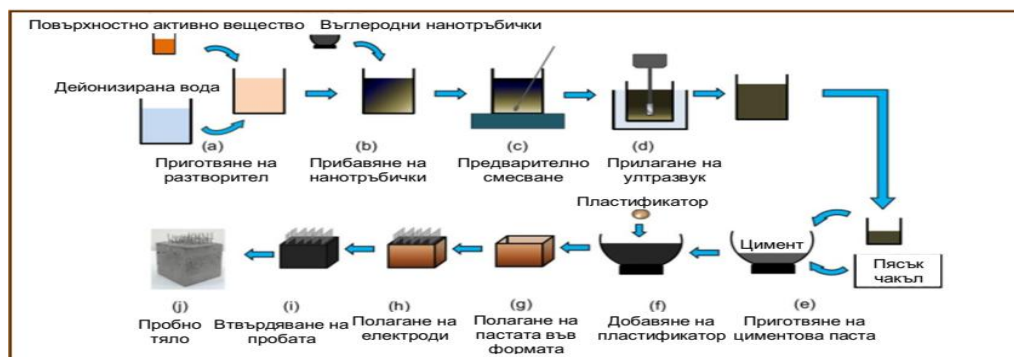
При разтоварена матрица с промяна на концентрацията на FF се променя съпротивлението и електропроводимостта на бетона. В Зона А преобладава йонна проводимост на матрицата. В Зона В се формират проводящи пътеки. Електронната проводимост започва да доминира. Зона С е проводима зона със стабилно ниско електрическото съпротивление.

При наличие на външно натоварване, материалът се деформира и електрическото съпротивление се променя. Факторите, които водят до промяна на електрическото съпротивление са промяна на устойчивостта на FF, промяна на връзката между FF и

матрицата, промяна между FF, промяна на ширината на тунелите между FF и промяна на капацитета. Тези фактори влияят върху чувствителността, но рядко променят вида на кривата и формираните от нея три зони.

3. Технология за обработка на ISSC

Технологията за обработка на ISSC включва три основни стъпки: смесване (разпръскване) и хомогенизиране, формоване и втвърдяване. Технологията оказва силно влияние върху механичните и електрическите характеристики на ISSC. Следователно тя е ключов проблем, който трябва да бъде отчетен при производството на ISSC. Основната производствена схема е дадена на фиг. 6.



Фиг. 6. Процес на производство на ISSC [8, 16]

Трябва да се прилага ефективна технология за производство с минимална концентрация на пълнителя, за намаляване на себестойността. Необходими са прости и ниско енергийни технологии, които са повторяеми за различни мащаби на едрина на пълнителя, без промяна на цялостния производствен процес. Грубите едри добавъчни материали влошават чувствителността на този бетон. За това предизвикателство се налага използване на хибридни пълнители, многомащабна композитна технология и проводими добавъчни материали. Необходими са прости и удобни методи за оценка на дисперсията на пълнителя и качеството на бетонната матрица. Трябва да се установи единен метод за специфициране на проектирането, оптимизиране на състава и производство на ISSC.

3.1. Смесване и хомогенизиране

Смесването (разпръскването) включва диспергиране на FF в матрицата и разпределение на добавъчните материали в циментовата паста. То е най-важната стъпка в обработване на бетонната смес и влияе най-осезаемо върху нейните свойства. Ефективността на смесването на FF може да бъде оценена чрез:

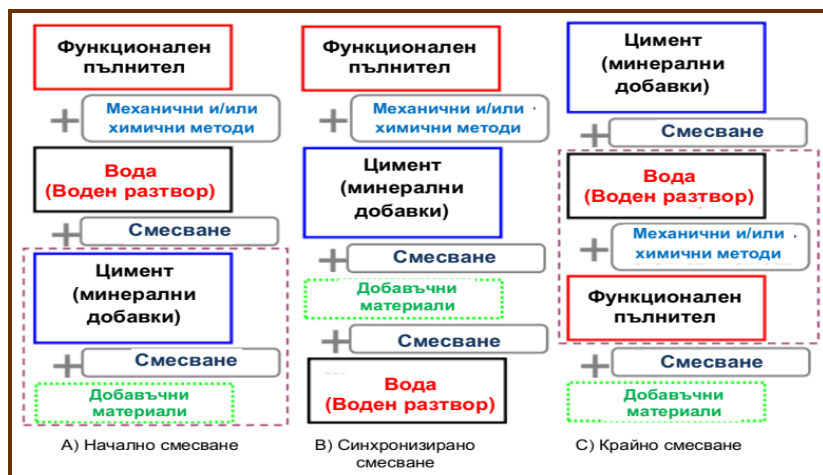
- изследване на микроструктурата;
- измерване на макроелектрическото съпротивление;
- изследване на прясната бетонна смес;
- изследване на воден разтвор на FF за определяне на дисперсността им в него.

Според реда на добавяне на FF, процесът на смесване (разпръскване) включва три основни етапа:

- начално смесване;
- синхронно смесване;
- крайно смесване.

Подходящите процеси на разпръскване са различни за различните FF. Трябва да се отбележи, че тези разпръсквания трябва да се използват съвместно с хибридни пълнители. Съществуващите методи са физически и химически.

- **Физически методи** (т.е. механични методи) – това са *топково фрезване* (много подходящ за различни фибри) и *смесване с ултразвук във воден разтвор*. При тези методи се избягват повреди на пълнителя. Резултатите показват, че особено високо качество и ниво на дисперсия се получава при ултразвукова обработка [18].
- **Химически методи** – модифицират повърхността на пълнителя. Те са:
 - *нековалентна повърхностна модификация* – подобрява омокрянето на повърхностите, като променя разтворимостта и дисперсността на пълнителя. Този метод не води до увреждане на пълнителя и се отличава с ниска консумация на енергия;
 - *ковалентна повърхностна модификация* – чрез повърхностна функционализация на пълнителя се подобрява омокрянето и намалява склонността към агломериране (слепване). Не се препоръчва агресивна химическа функционализация, със силни киселини при висока температура.



Фиг. 7. Основни етапи на смесването [3]

За някои пълнители (напр. CF, CNT и CNF), физическите и химическите методи трудно се отделят, поради което се прилагат съвместно. Препоръчителните технологии на смесване за различните пълнители са дадени в табл. 4.

Оценката на смесването се извършва с помощта на метода за наблюдение на микроструктурата, метода за измерване на макроелектрическо съпротивление, метода на прясна смес и метода за наблюдение на воден разтвор на функционални пълнители.

Таблица 4. Видове технологии на смесване

Технология на смесване и разпръскване	Подходящ функционален пълнител
Първоначално смесване	CF, CNT, CNB, CB, nano TiO ₂ , nano Fe ₂ O ₃
Синхронно смесване	CF, SF, SS, MFA, GP
Крайно смесване	CB, SF, NP, GP, PVAF
<i>Хибридни процеси за хибридни пълнители</i>	
Синхронно смесване + крайно смесване	CB+PVAF
Първоначално смесване + синхронно смесване	CF+CB CF+CNT
Синхронно смесване + крайно смесване	GP+CF

3.2. Формоване

За оформяне на сместа на ISSC е необходима ефективна технология на формоване. Технологията на формоване определя уплътняването на композита, което влияе върху механичните характеристики и чувствителността на бетона. За производството на ISSC са използвани четири технологии за формоване: леење и вибрации, екструдирание, пресоване и хидротермални технологии за горещо пресоване. Грижите в ранна възраст оказват сериозно влияние върху структурата на бетона и неговата чувствителност.

3.3. Втвърдяване

Втвърдяването на ISSC включва два аспекта: състояние и възраст, които доминират характеристиките на порите, продуктите на хидратация и съдържанието на вода в композита. При различни режими на втвърдяване композитите показват различни механични свойства, адхезионна връзка между функционалните пълнители и матрицата, разпределение на водата в структурата на композита. Следователно, чувствителността на ISSC е тясно свързана с режима на втвърдяване и грижите в ранна възраст.

4. Сензорни свойства на ISSC

Връзката „структура-свойство“ винаги е била в основата на материалознанието. ISSC като многофазен и многомащабен композит се характеризира с много сложна структура, обхващаща над 10 порядъка по размер от нанометри до десетки метри. Това налага изучаване на структурата на различни мащабни нива и нейното влияние върху сензорните свойства на композита. Сензорните свойства определят връзката между физико-механичните и електрическите свойства на втвърдения композит.

Физико-механичните свойства якост на натиск, модул на еластичността, относително удължение, ширина на пукнатините, структура на втвърдения бетон, корозия на армировката, вибрации на конструкциите и др. се определят чрез познатите ни инвазивни и неинвазивни методи. Определянето на сензорните свойства е основното предизвикателство. ISSC е композит със сложни електрически свойства, като електрокапацитет, съпротивление, пиезорезистивност, диелектрични характеристики, импеданс, електрическо реактивно съпротивление, относителна диелектрична константа,

електрочувствителност и др. Сензорните свойства на бетона се отличават съществено от тези на други конструктивни материали. Тук трябва се познават видовете сензорни сигнали, определящи електрическите свойства на материала, видовете електроди, заложен в бетона, методите за измерване на електрическото съпротивление, както и методите за обработка на всички тези сигнали.

Сензорните свойства на ISSC могат да бъдат описани чрез реакцията на електрическите свойства към външна сила или деформация. Тази реакция може да бъде оценена чрез някои параметри, като например диапазон на чувствителността, линейност, повторяемост, хистерезис, нулеви отмествания и др. Чувствителността е най-важният параметър за характеризирани на сензорните свойства на ISSC.

Сензорното поведение на ISSC зависи от условията на натоварване. Обикновено електрическото съпротивление намалява при натиск и се увеличава при опън, а при огъване е комбинация от двете. Сензорните свойства се влияят от фактори като концентрация на FF, геометрична форма на FF, скорост на натоварване, съдържание на вода, температура и др. Характеризирането на сензорните свойства на ISSC силно зависи от измерването на сензорния сигнал, за каквито се използват електрическото съпротивление, импедансът, реактивното съпротивление, капацитетът и относителната диелектрична константа. Обемното електрическо съпротивление при постоянен ток е най-често използваният сензорен критерий. Съществуват добри съответстващи зависимости между електрическите сигнали и натоварването/деформацията на ISSC при различни времеви и пространствени условия. Следователно деформациите, напреженията, пукнатините и повредите вътре в ISSC могат да бъдат наблюдавани "in situ" чрез измерване на електрическите сигнали.

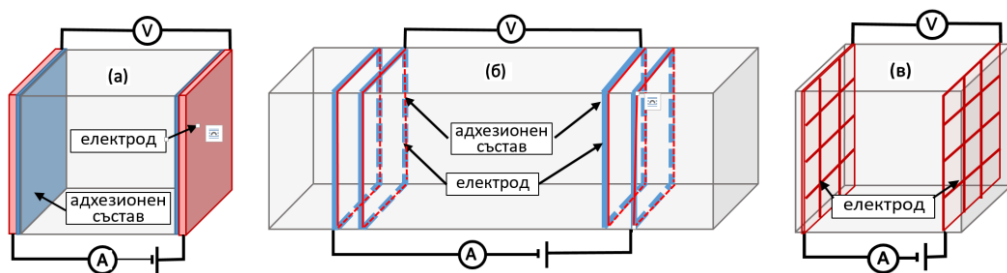
Електродите свързват ISSC с измервателното устройство. От тях зависи точността на измерването и чувствителността на сигнала. Производството на електрода и методите за измерване на електрическото съпротивление са два критични фактора, влияещи върху точността на сензорния сигнал на ISSC. Сензорният сигнал на ISSC може да бъде получен чрез кабелна или безжична технология с последващо премахване на шума от измерването и извличането на ефективен сензорен сигнал. Изработването на електродите за тези бетони включва три аспекта: избор на електродни материали, фиксиране на електродите и разположение на електродите.

Материалът за сензорните електроди има ниско електрическо съпротивление и стабилна проводимост (медни, неръждаеми, оловни). Електродите обикновено се състоят от метални люспи, метално фолио, метална мрежа, меден контур, метална пръчка, въглероден прът, медна лента, проводима боя и др. Фиксирането се извършва чрез вграждане и залепване.

В зависимост от разположението на електродите различаваме 2-сондови методи, които са лесни за използване и 4-сондови методи, които се препоръчват като по-чувствителни. В момента се прилагат 6 основни схеми на фиксиране и разположение на електродите:

- Повърхностно прикрепени ламелни електроди (а) и лентови електроди (б) – използват се при лабораторни измервания за определяне на чувствителността на бетона. Не влошават механичните свойства. Лесно се отлепват.
- Вградени в бетона 2 броя мрежи (в) – 2-сондов метод.
- Вградени в бетона 4 броя мрежи – 4-сондов метод.
- Перфорирани плочи.
- Контурен електрод.

Методът с 4 вградени електрода е по-добър от този с 4 електрода, залепени на повърхността. Тези методи са подходящи при изпитване на натиск, което е по-често срещаното се натоварване на бетона. При изпитване на опън и огъване могат да се направят незначителни корекции.



Фиг. 8. Фиксиране на електродите [3, 18]

Върху сензорните свойства на ISSC влияят [18]:

- Състав на бетона – вид на компонентите, пропорция, технология на производството, условия на околната среда и др.
- Концентрация на функционалния пълнител – това е определящо при формиране на проводимата мрежа в бетона.
- Геометрична форма на функционалния пълнител – структура, дължина на частиците на пълнителя, размер на частиците и морфология на повърхността.
- Скорост на натоварването – високата скорост на натоварване ограничава развитието на пукнатините и възпрепятства пластичната деформация. Това променя тенденцията за промяна на електропроводимостта.
- Съдържанието на вода в ISSC – зависи от относителната влажност на околната среда, температурата, режима на втвърдяване и др. Влажността променя електропроводимостта и влияе върху чувствителността.
- Температура – промяната на температурата води до разширяване или свиване на ISSC, което променя дистанцията между частиците на FF, повишава или намалява енергията на прехода на електроните на FF и променя водното съдържание на матрицата.
- Циклично замразяване и размразяване – многократно повтарящите се деформации и натрупването на свързващи и разширяващи се пукнатини променят съпротивлението на бетона и влошават чувствителността.
- Периодично мокрене и сушене – в сухо състояние електропроводимостта се осъществява с електрони, а във водонаситено състояние чрез йони. Периодичното омокряне и сушене влияе на дълготрайността на бетона и води до промяна на електропроводимостта.
- Корозионна среда – в краткосрочен план увеличава електрическата проводимост и съответно чувствителността на бетона. В дългосрочен план води до разрушаване на бетона и влошаване на чувствителността.
- Продължителност и ексцентрицитет на натоварването.
- Честота на натоварване.

- Размер на пробните тела.
- Разстояние между електродите и др.

5. Предаване на информацията

Електрическите сигнали от ISSC конвенционално се реализират с помощта на кабелен метод за получаване на данни. Безжичният метод за измерване се използва за получаване на сигнали, за да се решат някои проблеми на кабелния метод. Като цяло, получените сензорни сигнали неизбежно са замърсени с шум от измерването. Последващата технология за обработка на сигнала е полезна и служи за премахване на шума от измерването и извличане на истинска информация от сензорния сигнал.

Количествено измеримите електрически изходи обикновено се измерват с методи на постоянен ток (DC).

Следователно е необходимо да се разработят някои нови методи за проектиране на електроди, методи за проектиране на измервателни вериги, методи за събиране и обработка на сигнали за цялостно, задълбочено и точно извличане на ефективната информация, отразяваща структурните условия на ISSC. Крайната цел е да се разработят стандартни методи за измерване и да се нормира измервателно оборудване. ISSC може да се комбинира с оптични влакна, пиезоелектрични материали, сплави с памет на формата, самодиагностициращи се полимерни композити и др. [11]. Калибрирането на SSCS е ключова предпоставка за тяхното ефективно приложение, което изисква установяване на връзка между изменението на електрическото съпротивление и напрежението [13].

6. Видове натоварвания

Проводимият механизъм в бетона се променя в зависимост от вида на натоварването, което влияе върху концентрацията на функционалния пълнител в определени области.

6.1. Натисково натоварване

6.1.1. Монотонно натисково натоварване

Изменението на плътността преминава през фази на намаляване, баланс и рязко увеличаване. Това съответства на уплътняването, зараждането на микропукнатини и развитието на пукнатини. При поява и развитие на микропукнатини проводимата матрица се разкъсва и електрическото съпротивление нараства. Това се потвърждава при 1-осно, 2-осно и 3-осно натисково натоварване. Уплътняването приближава частиците на FF и това подобрява електрическата проводимост.

6.1.2. Циклично натисково натоварване

Във всеки натисков цикъл съпротивлението намалява, а при разтоварване се увеличава. Това зависи от амплитудата, честотата и др. След пълно разтоварване, съпротивлението се различава от това на ненатоварен образец. Това се обяснява с някои вътрешни дефекти в композита, които намаляват бавно при цикличното натоварване.

- При амплитуда до 30 % от разрушителното напрежение – промените в електросъпротивлението на бетона са обратими, което се явява резултат от обратимостта на еластичните деформации.
- При амплитуда 30 – 75 % от разрушителното напрежение – промяната в електрическото съпротивление е обратима, докато базовото електрическо съпротивление е необратимо. Това се дължи на незначителни повреди на матрицата и последваща реконструкция на проводящата мрежа.
- При амплитуда над 75 % от разрушителното напрежение – промените в електрическото съпротивление и базовото електрическо съпротивление са необратими, защото повредите в матрицата са обширни и проводимата мрежа е сериозно разрушена.

6.1.3. Ударно натисково натоварване

Ударното натоварване е едно от често срещаните натоварвания за бетонни конструкции. Самодиагностициращият се бетон поема добре натисково натоварване без повреди.

6.2. Опънно натоварване

6.2.1. Монотонно опънно напрежение

При това натоварване съпротивлението нараства поради отдалечаване на частиците на пълнителя. Това се наблюдава при почти всички пълнители CF, найлоново влакно с покритие от въглерод, PVAF, хибрид PVAF и SF, хибрид PVAF и CF, хибридни PVAF и СВ. Установени са добри корелации между електрическото и механичното поведение на ISSC. За оценка на разрушението и пукнатинообразуването се използва електрическото съпротивление.

6.2.2. Циклично опънно напрежение

Електрическото съпротивление се увеличава при натоварване и намалява при разтоварване на циклите. Както при цикличното натисково натоварване, вариацията на базовото електрическо съпротивление и на електрическото съпротивление са различни при различните амплитуди на натоварването. Базовото съпротивление и промяната в съпротивлението са обратими в рамките на еластичната област. При висока амплитуда на напрежението промяната в съпротивлението и базовото съпротивление са необратими. Това е потвърдено от изследване на CF, SF, найлонови влакна с покритие от въглерод, хибридни PVAF и SF и CNT.

7. Огъване

В различните участъци на пробата имаме натиск и опън. Поради това сензорното поведение при огъване е съвкупност от сензорни свойства при натиск и опън. Това силно зависи от компонентите на състава и разположението на електродите. Следователно, работната диаграма на бетона, появата на пукнатини и дефекти могат да бъдат наблюдавани “in situ”, чрез измерване на електрическите сигнали.

8. Сфери на приложение

Областите на приложение на ISSC варират от мониторинг на мостове, железопътни съоръжения, хидротехнически съоръжения, трафик на съоръжения и др. до мониторинг на охранителни системи и гранични съоръжения [13].

Производството на ISSC е различно от обикновения бетон. То изисква прецизно проектиране на състава, особено за процедурата на диспергиране, която пряко влияе върху сензорните ефекти. В момента процесът на диспергиране се провежда предимно в лабораторна среда, където ефективността и ефикасността могат да бъдат гарантирани. Подходящият метод на диспергиране обаче се превърна в пречка, която ограничава приложението на ISSC по повтаряем, прост и мащабируем начин.

ISSC надеждно решава проблемите с издръжливостта на сензорите и несъвместимостта между бетона и конвенционалните сензори. ISSC може да се използва в различните конструктивни елементи по различни способы – монолитно (целият елемент е от ISSC), във вид на повърхностно покритие, вграден в елемента и др. Чрез ISSC могат да се проследяват мултиструктурни параметри като напрежение, деформация, повреди, корозия и напукване. Следователно, ISSC предоставя нов подход за оценка на безопасността и издръжливостта на конструкцията по време на нейния експлоатационен живот, за да се гарантира нейната експлоатационна годност и устойчивост.

Основните перспективи са свързани с прилагане на безжични бетонови сензори, полево приложение, включване към интернет системите, хибридно приложение с конвенционални сензори, използване като акселерометри, числено моделиране, дългосрочен мониторинг, приложение на „цифрови близнаци“ и др. [13 – 15, 19].

9. Заключение

В този обзор е описан цялостен подход към използването на ISSC, като започне от избора на материал до неговото приложение, чрез използване на съществуваща литература и изследвания. В резултат на проведеня анализ могат да се обосноват следните основни изводи:

- Изследвани са основните компоненти на конструктивния мониторинг и възможността за използване на ISSC, като сензор за диагностициране на конструкциите, като са определени съществените изисквания към състава на бетонната смес на макро- и микрониво и необходимите свойства на основните компоненти.
- Анализирани са методологията за определяне на прага на проникване на функционалния пълнител и оптималното съдържание при използване на различни видове. Изследвани са възможностите за прилагане на единични функционални пълнители и възможностите за комбиниране на хибридните пълнители за различни състави.
- Анализирани са възможностите за използване на основни диспергиращи елементи в състава на ISSC.
- Определени са основните изисквания при производство на ISSC, като са оценени сензорните свойства на бетона при измерване на реактивно съпротивление, импеданс, електрокапацитет, повърхностно електрическо съпротивление и относителната диелектрична константа. Анализирани са 4 основни метода за прикрепване на измерващите електроди към бетона и са установени вариантни решения за различни видове сензорни устройства на база ISSC.

- Обобщени са основните фактори, които влияят върху сензитивността и чувствителността на ISSC, като са посочени препоръки за техния функционален контрол.
- Анализирани са възможностите за прилагане на ISSC в елементи, работещи под въздействие на напрежения на натиск, опън и огъване, както и възможните форми: монолитен бетон, покритие на елементи, имплантиране в сандвич елементи. Анализирани са сферите на приложение на ISSC.

В обобщение може да се посочи, че ISSC интегрира обикновен бетон с микро- или наномасщабни пълнителни материали с електропроводима функция. Това предоставя възможност композитът да се отличава с надеждни сензорни функции в отговор на промяна на напрежението/деформацията и възникване на повреди. Това определя възможността за ранно диагностициране на конструкциите с цел недопускане на фатални последици за тях.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. *Zhuang Tian, Yancheng Li, Jiajia Zheng, Shuguang Wang.* A state-of-the-art on self-sensing concrete: Materials, fabrication and properties, *Composites Part B: Engineering Volume 177*, 15 November 2019, 107437.
2. *Li, G. Y., P. M. Wang, X. Zhao.* Pressure-sensitive properties and microstructure of carbon nanotube reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(5): p. 377 – 382.
3. *Baoguo Han, Xun Yu, Jinping Ou.* Self-Sensing Concrete in Smart Structures Book, 2015.
4. *Ali Majeed Al-DahawiI, Oğuzhan Öztürk, Farhad Emami, Mustafa Şahmaran, Mohamed Lachemi.* Self-Sensing Cementitious Composites for Smart Structures, SMAR 2015 Third Conference on Smart Monitoring.
5. *Liqing Zhang, Sufen Dong, Siqi Ding, Shengwei Sun, Baoguo Han.* Intrinsic Self-Sensing Concrete for Smart Infrastructures, 2016 1st International Workshop on Structural Health Monitoring for Railway Systems (IWSHM-RS 2016) ISBN: 978-1-60595-371-7.
6. *Osama, M. Ghazi Al-Kerttani, Ammar, A. Muttar.* Study of the Behavior of Self-Sensing Concrete under the Influence of Different Mechanical Loads: A Review, *Journal of AL-Rafidain University College for Sciences* (2022); Issue 52; 227 – 236.
7. *Mo Li, Vincent W. J. Lin, Jerome P. Lynch, Victor C. Li.* Carbon Black Engineered Cementitious Composites – Mechanical and Electrical Characterization, SP-292-5.
8. *Kay Christian Ackermann.* Sels-sensing concrete for structural health monitoring of smart infrastructu, University of Rhode Island, 2018, res.
9. *D. K. Mishra, J. Yu, C. K. Y. Leung.* Self-sensing and Self-healing ‘Smart’ Cement-based Materials – A Review of the State of the Art , Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures Paper Number TIM04 18 – 20 July 2018 University of Leeds, Leeds, West Yorkshire, LS2 9JT, United Kingdom.
10. *Mohammadmahdi Abedi, Raul Fangueiro, Antonio Gomes Correia.* A review of intrinsic self-sensing cementitious composites and prospects for their application in transport infrastructures, *Construction and Building Materials* 310 (2021) 125139.
11. *Wrya A. Abdullah, Azad a.Mohammed, Avin H. Abdullah.* Self-sensing concrete: D Brief Review, *Proceedings of ISER 211th International Conference, Sydney, Australia, 24th-25th July, 2019.*

12. *Facheng Song, Qinghua Li, Shilang Xu*. A review of self-sensing ultra-high performance concrete: Towards next-generation smart structural materials, *Cement and Concrete Composites* Volume 145, January 2024, 105350.

13. *Mohammad Siahkouhi, Maria Rashid, Fidelis Mashiri, Farhad Aslani, Mohammad Sadegh Ayubirad*. Application of self-sensing concrete sensors for bridge monitoring A review of recent developments, challenges, and future prospects, *Measurement* 245 2025.

14. *Kousalya Ramachandran, Ponmalar Vijayan, Gunasekaran Murali, Nikolai Ivanovich Vatin*. A Review on Principles, Theories and Materials for Self-Sensing Concrete for Structural Applications, *Materials* 2022, 15(11), 3831, <https://doi.org/10.3390/ma15113831>, Submission received: 26 April 2022.

15. *D. D. L. Chung*. Self-sensing concrete: from resistance-based sensing to capacitance-based sensing. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2021, Vol. 12, No. 1, 1–19, <https://doi.org/10.1080/19475411.2020.1843560>.

16. *Siqi Ding, Sufen Dong, Ashraf Ashour, Baoguo Han*. Development of sensing concrete: Principles, properties and its applications, *J. Appl. Phys.* 126, 241101 (2019); doi: 10.1063/1.5128242 126, 241101-1, Published under license by AIP Publishing.

17. *Antonella D'Alessandro, Filippo Ubertinia, Simon Laflamme, Marco Rallinia, Annibale L. Materazzia, Josè M. Kennya*. Strain Sensitivity of Carbon Nanotube Cement-based Composites for Structural Health Monitoring. <https://www.spiedigitallibrary.org/terms-of-use>.

18. *Zere Bekzhanova, Shazim Ali Memon, Jong Ryeol Kim*. Self-Sensing Cementitious Composites: Review and Perspective, <https://doi.org/10.3390/nano11092355>, *Nanomaterials* 2021, 11, 2355.

19. *Saptarshi Sasmal, B. S. Sindu*. Smart cementitious nanocomposites for self-sensing and continuous health monitoring of structures, *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00021-0>, Copyright © 2020 Elsevier Inc. All rights reserved.

INTRINSIC SELF-SENSING CONCRETE: COMPOSITION, REQUIREMENTS, AREAS OF APPLICATION

B. Petrov¹

Keywords: *self-sensing concrete, functional fillers, dispersing materials, sensory properties*

ABSTRACT

The paper analyzes the basic principles for the design and implementation of Intrinsic Self-Sensing Concrete (ISSC). The essential requirements for the composition and technology for the production of this concrete are assessed. The sensitivity threshold values for various functional fillers are predicted and recommendations are made for the appropriate methods for homogenizing the components in the concrete mixture. Its sensory properties are analyzed, as well as the influence of various factors leading to the improvement of the sensitivity of concrete. The possibilities for the application of this type of concrete in our country are presented.

¹ Bogomil Petrov, Prof. Dr. Eng., Dept. "Building Materials and Insulation", UACEG, 1 H. Smirnovski Blvd., Sofia 1046, e-mail: BWP_FCE@uacg.bg