

Primljen / Received: 5.3.2018.

Ispravljen / Corrected: 3.8.2018.

Prihvaćen / Accepted: 15.9.2018.

Dostupno online / Available online: 10.2.2019.

Inovativne senzorske tehnologije za beton u nuklearnim elektranama

Autori:



Dr.sc. **Scott David B.**, dipl.ing.građ.
Sveučilište North Carolina u Charlotte, SAD
Odjel za građevinarstvo i okolišno inženjerstvo
dscott@epri.com



Prof.dr.sc. **Chen Shen-En**, dipl.ing.arh.
Sveučilište North Carolina u Charlotte, SAD
Odjel za građevinarstvo i okolišno inženjerstvo
schen12@unc.edu

Prethodno priopćenje

Scott David B., Chen Shen-En

Inovativne senzorske tehnologije za beton u nuklearnim elektranama

Postupak nerazornog ispitivanja primjenjuje se za istraživanja tijekom izvođenja i uporabe betonskih konstrukcija koje se koriste za potrebe nuklearne industrije. Beton u nuklearnim elektranama često se odlikuje posebnim svojstvima koja ga čine osjetljivim na propadanje te koja onemogućuju analizu i kontrolu pomoću tradicionalnih nerazornih postupaka. Moderne tehnologije analize unutar betona omogućuju dubinsko istraživanje nuklearnih armiranobetonskih konstrukcija. U radu se analiziraju perspektivne dubinske i površinske analitičke metode te se kritički ocjenjuje primjena senzora u analizi betonskih konstrukcija koje se koriste u nuklearnoj industriji.

Ključne riječi:

nuklearne elektrane, beton, praćenje stanja konstrukcija, nerazorno ispitivanje, senzori

Preliminary note

Scott David B., Chen Shen-En

Innovative concrete sensing technologies for nuclear power plants

Nondestructive evaluation has been used to investigate construction and use of concrete structures for the nuclear power industry. Nuclear concrete often has unique structural characteristics which increase proclivity towards degradation and inhibit analysis and inspection using traditional nondestructive techniques. Modern embedded sensing technologies can provide opportunities for the in-depth evaluation of nuclear reinforced-concrete structures. This paper offers an assessment of emerging embedded and surficial sensor techniques, and critically evaluates sensor applicability in the analysis of concrete structures used in the nuclear power industry.

Key words:

nuclear power plants, concrete, structural health monitoring, nondestructive evaluation, sensors

Vorherige Mitteilung

Scott David B., Chen Shen-En

Innovative Sensortechnologie für Beton in Kernkraftwerken

Das Werkstoffprüfverfahren wird für die Untersuchung während der Ausführung und Verwendung von Betonkonstruktionen angewendet, die für die Kernkraftindustrie verwendet werden. Der Beton in Kernkraftwerken zeichnet sich häufig durch besondere Eigenschaften aus, die ihn anfällig auf Zerfall machen, und die eine Analyse und Kontrolle mithilfe traditioneller Werkstoffprüfverfahren unmöglich machen. Moderne Technologien der Analyse innerhalb des Betons ermöglichen eine Tiefenuntersuchung der nuklearen Stahlbetonkonstruktionen. In der Abhandlung werden prospektive Tiefen- und Oberflächenanalyseverfahren analysiert und der Einsatz von Sensoren bei der Analyse von Betonkonstruktionen, die in der Kernkraftindustrie verwendet werden, wird kritisch beurteilt.

Schlüsselwörter:

Kernkraftwerke, Beton, kontinuierliche Überwachung der Konstruktion, Werkstoffprüfung, Sensoren

1. Uvod

Nerazorna ispitivanja (eng. *Nondestructive evaluation* - NDE) već se desetljećima primjenjuju u istraživanju i ocjenjivanju betonskih konstrukcija koje se koriste u nuklearnim postrojenjima (eng. *nuclear concrete structures* - NCS) [1]. Nuklearne konstrukcije izvedene od armiranog betona uglavnom se posebno projektiraju za svaku komercijalnu građevinu. Primjeri armiranobetonskih konstrukcija koje se koriste na nuklearnim postrojenjima su: ulazna građevina za rashladni fluid, rashladni tornjevi, zaštitne zgrade te bazeni i bačve za pohranjivanje istrošenog nuklearnog goriva. Nerazorna ispitivanja (NDE) primjenjuju se za istraživanje stanja betonskih zaštitnih građevina na nuklearnim postrojenjima, tj. za istraživanje osjetljivosti tih građevina na kemijske utjecaje, fizikalne utjecaje te na faktore koji dovode do propadanja materijala kao što su zamor, vibracije, korozija, visoke temperature itd. [1, 2].

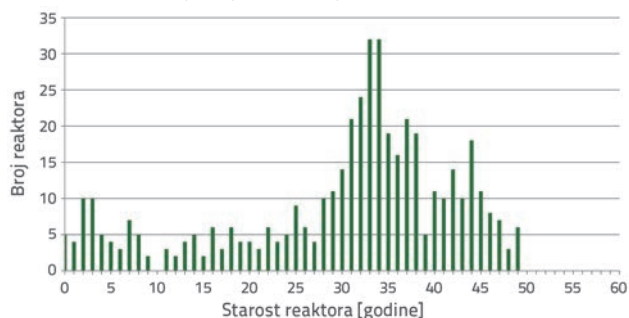
Nekim dijelovima tih konstrukcija teško se može pristupiti u svrhu provođenja nerazornih ispitivanja i to zbog njihovog položaja i osjetljivosti. Osim toga, u nuklearnoj se industriji koriste mnoge složene konstrukcije (npr. čelikom obložene betonske zaštitne konstrukcije, bačve i bazeni za pohranjivanje otpadnog goriva), što dodatno ograničava pristup i izravno provođenje nerazornih ispitivanja. Ponekad se zbog tih ograničenja nerazorna ispitivanja mogu provoditi samo na jednoj strani konstrukcije, ili su ona dodatno ograničena zbog mnogih prodora koji smanjuju mogućnost provođenja ispitivanja. Osim toga, treba naglasiti da su te građevine u pravilu vrlo robusne te da se sastoje od konstrukcijskih elemenata velikog promjera s velikom koncentracijom armature i s ograničenom mogućnošću pristupa (nekada je pristup moguć samo tijekom prekida rada), što je još jedan kritičan element koji otežava pregled u vrijeme održavanja postrojenja. Kombinacija svih tih poteškoća uvelike otežava provedbu konvencionalnih nerazornih ispitivanja i preciznih istraživanja koja se trebaju provoditi na nuklearnim postrojenjima.

Prema normi ACI 228.2R [3], tradicionalni nerazorni postupci ispitivanja mogu se svrstati u nekoliko općih kategorija: vizualni postupci, postupci pomoću valova generiranih naprezanjem, nuklearni postupci, magnetski i električni postupci, postupci na bazi prodiranja, infracrvena termografija i postupci poznati pod skupnim imenom RADAR. Kod svih tih postupaka (osim kod vizualnog pregleda) potrebna je energija kojom se ostvaruje kontakt s betonskim elementom te zatim mjerenje odziva elementa. Spomenuti se postupci provode na nuklearnim građevinama kod kojih se utvrdi tijekom analize stupnja oštećenja da je došlo do odvajanja [4-6]. Takvi se postupci mogu provoditi za određivanje mogućnosti pojave korozije armature, otpornosti na pojavu pukotina, modula elastičnosti, pojave pukotina, popuštanja veze, odvajanja, sačastog trošenja, promjene debljine elemenata itd. Postupci se mogu provoditi zasebno ili u raznim kombinacijama. U novije su vrijeme razvijene inovativne tehnologije kao što su mikrovalna holografija [7] ili ultrazvučni uređaji sa zračnim spajanjem (mjesto izravnog kontakta) [8, 9]. Ti se postupci često primjenjuju usporedno s tradicionalnim nerazornim ispitivanjima u svrhu određivanja stanja betonskih

konstrukcija na nuklearnim postrojenjima [10]. U praksi je danas dovoljno potvrđena i dokazana valjanost nerazornih ispitivanja koja se provode na uobičajenim betonskim građevinama [11-17]. U komercijalnoj industriji za generiranje nuklearne energije danas postoje mogućnosti brojnih inovativnih senzorskih postupaka kojima se mogu nadopuniti, pa čak u nekim slučajevima i zamijeniti, tradicionalni postupci nerazornog ispitivanja [18]. Ti postupci uključuju primjenu senzora sastavljenih od jednostjernih ugljikovih nanočevčica [19, 20], piezoelektrične keramike [21-23], optičkih vlakana [24] i elektrokemijskih materijala [25, 26]. Spomenuti senzori mogu biti površinski ili unutarnji, tj. mogu se postaviti na površini ili u unutrašnjosti konstrukcije i to bilo tijekom ili nakon izvođenja konstrukcijskog elementa [18-26]. Senzori mogu slati signale pomoću kontakta ili daljinskim upravljanjem [18, 27]. Senzorima se može utvrditi: čvrstoća materijala za vrijeme i nakon njege, deformacije u konstrukciji te razvoj pukotina [26]. Tim se unutarnjim i/ili površinskim sensorima (eng. *embedded and/or topical sensors* - ETS) mogu prevladati ograničenja koja se javljaju pri inspekciji betonskih konstrukcija u nuklearnim postrojenjima (NCS). Ovdje će se obrađivati nadolazeća i trajna poboljšanja senzorskih tehnologija i primjena tih tehnologija na betonske konstrukcije u nuklearnim postrojenjima (NCS). Postoje i vanjske senzorske tehnike s uređajima koji nisu spojeni s konstrukcijama koje se ispituju. Neke od njih su: otkrivanje i određivanje udaljenosti radiovalovima (eng. *radio detection and ranging* - RADAR), svjetlosno zamjećivanje i klasifikacija (eng. *light detection and ranging* - LIDAR), infracrvena termografija, RADAR sa sintetičkim otvorom antene (eng. *synthetic aperture* - SAR) itd. One međutim nisu predmet razmatranja ovog rada. Iako te senzorske tehnologije danas nisu u općoj upotrebi u nuklearnoj industriji, postoje realne mogućnosti za njihovu primjenu u svrhu praćenja stanja kako na postojećim tako i na budućim nuklearnim postrojenjima.

2. Oštećenje i propadanje armiranog betona na nuklearnim postrojenjima

Postoje brojni razlozi zbog kojih može doći do oštećenja betonskih konstrukcija na nuklearnim postrojenjima (NCS). Bez obzira na to da li se tek grade, ili su pri kraju vijeka trajanja, ili negdje u sredini svog postojanja, konstrukcije NCS mogu sadržavati oštećenja koja se trebaju istražiti.



Slika 1. Skupni prikaz starosti nuklearnih reaktora (podaci preuzeti iz [2])

U vrijeme pisanja ovog rada, u svijetu je u postupku građenja bilo 57 novih nuklearnih elektrana, a istovremeno je u radu bilo više stotina takvih elektrana. Većina od ukupno 448 reaktora koji su sada u upotrebi diljem svijeta stariji su od dvadeset godina - što je više od polovice uobičajenog ugovorenog vijeka trajanja (razdoblja dok vrijedi licencija) od četrdeset godina [2]. Na slici 1. prikazan je starosni presjek postojećih nuklearnih elektrana. Potkraj 2012. godine u SAD-u je petnaest nuklearnih postrojenja bilo starije od 40 godina, te se za njih redovno podnose molbe za produženje licencije za rad nakon prvobitnog razdoblja trajanja licencije (40 godina). Ocjena stanja betonskih konstrukcija na nuklearnim



Slika 2. Uobičajena oštećenja armiranog betona na nuklearnim postrojenjima [28]

postrojenjima treba sadržavati pregled konstrukcija koje su u stanju uporabljivosti (što je tehnička osnova za nastavak

Tablica 1. Prikaz nedostataka

Kategorija nedostataka	Vrsta nedostatka	Razdoblje moguće pojave unutar vijeka trajanja	Obuhvat nedostatka (konstrukcija/materijal)
Utjecaj okoline	Alkalnoagregatna reakcija (AAR)	Središnje razdoblje, LTO (dugoročno djelovanje)	Materijal
	Karbonatizacija	Središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Prodor klorida	Središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Deformacija i korozija armature	Središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Korozija čelične obloge	Središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Odgođeno nastajanje etringita (DEF)	Središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Iradijacija	LTO	Materijal
	Zračenje	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Prodor sulfata	Središnje razdoblje, LTO	Materijal
Utjecaj građenja	Pojava pukotina	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija i materijal
	Odvajanje	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija
	Smrzavanje-odmrzavanje	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Pojava sačaste strukture/šupljina	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija
	Skupljanje	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Materijal
Djelovanje na čelik	Puzanje	Središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija
	Odvajanje obloge i čelika	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija
	Zamor	LTO	Konstrukcija
	Nedostatak veze između moždanika	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija
	Popuštanje zatega ili glava zatega	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija
Ekstremni uvjeti (i ostalo)	Popuštanje obloge	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Požar	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Izlaganje visokim temperaturama	Središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Inkluzije (zatvorene tijekom izvođenja)	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija
	Udar projektila	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija
	Prodor vlage	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Materijal
	Temperaturne razlike	Početno razdoblje	Materijal
	Procurivanje	Početno razdoblje, središnje razdoblje, LTO	Konstrukcija
Erozija i/ili abrazija	Središnje razdoblje, LTO	Materijal	

Napomena: LTO - dugoročno djelovanje (eng. *long term operations*), DEF - Odgođeno nastajanje etringita (eng. *delayed ettringite formation*)

njihovog korištenja), te određivanje potrebnih popravaka u svrhu daljnjeg korištenja tih konstrukcija. U tablici 1. daje se pregled mehanizama oštećenja armiranobetonskih konstrukcija, koji se mogu podijeliti na oštećenja zbog utjecaja okoline, oštećenja uvjetovana građenjem te oštećenja zbog nepovoljnih/ekstremnih uvjeta rada. Na slici 2. prikazani su razni načini na koje dolazi do oštećenja armiranog betona.

2.1. Problemi zbog utjecaja okoline

Mnogi od nedostataka koji se spominju u tablici 1. dodatno se kompliciraju zbog posebnih svojstava betona nuklearnih betonskih konstrukcija (NCS). Na primjer, korozija metala može dovesti do povećanja obujma, tj. do dodatnog naprezanja u okolnom betonu te posljedično do pojave pukotina i pada čvrstoće betona [29]. Nakon toga često dolazi i do ljuštenja betona. Na pojavu korozije metala djelomično utječu i okolni uvjeti, a taj je utjecaj naročito izražen kod betona NCS jer se u njemu nalazi velika količina armature, kao što je detaljnije opisano u poglavlju 2.4.

Osim toga, u nuklearnim se postrojenjima za hlađenje upotrebljavaju velike količine vode kako bi se smanjila temperatura koja se razvija za vrijeme odvijanja nuklearnih procesa. Ta voda ponekad sadrži kloride koji se koriste za njeno pročišćavanje, ili se pak postrojenje nalazi u blizini mora, što znači da postoji velika opasnost od prodora klorida. Prodor klorida u beton potiče pojavu korozije armature. Uz mogućnost korozije armature, moguće je i kemijsko djelovanje u vidu alkalnoagregatne reakcije. Alkalnoagregatna reakcija može se javiti u dva oblika: kao alkalnosilikatna reakcija ili alkalnokarbonatna reakcija [30]. Propadanje betona zbog utjecaja okoline može se usporiti pomoću premaza/obloga i u tu se svrhu koriste boje, mortovi, tekuća guma i smola [31]. Međutim, neodgovarajući odabir obloge/premaza ili izlaganje izrazito nepovoljnim uvjetima ipak može dovesti do ljuštenja, mjehuranja ili ljuštenja.

2.2. Problemi zbog utjecaja građenja

Mnogi problemi s betonom javljaju se već u fazi građenja, a neki od njih su pojava mrežastih pukotina, unutarnjih šupljina i pukotina položenih bilo poprečno i/ili paralelno s površinom betona. Deblji elementi betonskih konstrukcija nuklearnih postrojenja podložni su pojavi vrlo velikih razlika u temperaturi između središnjih i površinskih dijelova betona, što može dovesti do odgođenog nastajanja etringita te posljedično do pojave mrežastih pukotina. Mrežaste pukotine su niz međusobno povezanih pukotina koje se prostiru po velikim površinama betona. Naročito često se javljaju u masivnom betonu koji se koristi u betonskim konstrukcijama tipa NCS.

Kod nuklearnih betonskih konstrukcija također je problematična upotreba značajnih količina armature isto kao i primjena prednapregnutih zatega. Mnoge betonske konstrukcije koje se koriste u nuklearnim postrojenjima pojačane su naknadno

napetim zategama i to kako horizontalno (kružne zatege) tako i vertikalno. Zatege se koriste kako bi se osigurala tlačna čvrstoća betona što znači da te zatege trebaju izdržati izuzetno jake sile naprezanja. To s vremenom može dovesti do rastezanja zatega te, posljedično, do pojave pukotina u betonu i pucanja zatega. Do odvajanja betona od čelika može doći kod spregnutih konstrukcija uslijed skupljanja ili vanjskih opterećenja. Zone u kojima je došlo do takvog odvajanja podložne su prodoru onečišćenja, što uzrokuje propadanje betona.

2.3. Problemi u vezi s upotrebom čelika

U novije se vrijeme primjenjuju različita moguća rješenja kako bi se čelik zamijenio drugim materijalima. Čelik, međutim, bilo u obliku rebraste armature ili napetih kabela/zatega, i dalje prevladava kada je potrebno osigurati veću vlačnu čvrstoću betona. Nažalost, upotrebom čelika aktiviraju se dodatni mehanizmi propadanja koji dovode do brojnih problema, od pojave estetskih nedostataka pa sve do popuštanja konstrukcije. Kao što je već navedeno, pojava korozije je najčešći problem koji se povezuje s uporabom čelika. ACI (Američki institut za beton) definira koroziju kao propadanje metala uslijed kemijskih, elektrokemijskih ili elektrolitskih reakcija u kontaktu s okolinom [29]. Korozija se javlja kao posljedica djelovanja: klorida koji se nalaze u betonu, karbonatizacije, lutajućih struja, a u nekim slučajevima nastaje uslijed galvanске indukcije kroz lokalno različite metale [32-34]. U najboljem slučaju, korozija postupno prodire kroz pore i spojeve na površinu betona gdje se iskazuje kao estetski nedostatak. Obično je crvenkastosmeđe boje, a javlja se u obliku očvrsljelih listića ili kao želatinozni nusproizvod. Važno je napomenuti da korozija napete zatege/kabela može uzrokovati naglo rušenje konstrukcije. Tijekom kemijske reakcije proizvodi korozije zamjenjuju potrošeni čelik s većim obujmom korodiranog materijala. Tako povećani obujam dovodi do dodatnog naprezanja okolnog betona, što posljedično dovodi do pojave pukotina i slabljenja betona. Zahvaćenost korozijom tradicionalno se ispituje elektrokemijskim postupcima koji se provode kako bi se odredila moguća brzina napredovanje korozije. Tim se postupcima ipak ne može dokazati tj. potvrditi u kojoj je mjeri korozija već zahvatila konstrukciju. Jedna od opcija je i istraživanje mogućnosti da se pomoću nerazornih metoda odredi stupanj napredovanja korozije.

Dodatni mehanizmi propadanja betona zbog utjecaja armature zahvaćene korozijom jesu puzanje, gubitak veze (tijekom ili nakon građenja), zamor i pucanje [35]. Svi ti mehanizmi povezani su s mehaničkim odnosom između armature i betona pod utjecajem opterećenja. Na njih u velikoj mjeri utječe kakvoća projektiranja i građenja. Na primjer, ako pokrov iznad sidra zatege nije dostatan, tada sidro neće moći izdržati naprezanja koja se prenose sa zatege te će naglo popustiti. Isto tako, beton iskazuje tendenciju puzanja kada je izložen dugotrajnom opterećenju. To se može dogoditi kod naknadno napetih i prednapetih konstrukcija te kod običnih armiranobetonskih konstrukcija.

2.4. Utjecaj ekstremnih uvjeta

Prema normi ACI 349.3R [36], zračenje neutrona utječe na kristalastu strukturu cementne matrice i na mehanička svojstva armature što dovodi do smanjenja duktilnosti čelika [37]. Prema rezultatima iz literature, izlaganje gama-zračenju od $>10^{10}$ rada može dovesti do značajnog povećanja obujma betona i smanjenja čvrstoće [38].

Kod nuklearnih elektrana, para nastaje u postupku kontrole pretjerane topline koja se razvija tijekom nuklearnih reakcija između radioaktivnih materijala. Temperature koje se pritom razvijaju dosežu i do nekoliko stotina Fahrenheitovih stupnjeva (> 315 °C). Tako velika toplinska opterećenja isušuju beton i smanjuju njegovu elastičnost. Osim toga, dugotrajno izlaganje visokim temperaturama može dovesti do gubitka duktilnosti naknadno napetih zatega koje se koriste u betonskim konstrukcijama nuklearnih postrojenja. Provjera tlaka ili procurivanja na zaštitnim građevinama u nuklearnim postrojenjima obavlja se ispitivanjem stope procurivanja (eng. *Leak Rate - LR*) [39].

3. Mehanika građevina u nuklearnim postrojenjima

Opisana oštećenja betona u nuklearnim postrojenjima obično se smatraju materijalnim oštećenjima a ne oštećenjima same konstrukcije. Stoga se mogu primijeniti klasični mehanički opisi oštećenja materijala kao što su lom, zamor i korozija. Mehanički opisi oštećenja materijala temelje se na konstitutivnom ponašanju materijala, kao što je to opisano u tablici 2. Neki od konstitutivnih modela mogu ovisiti o brzini promjene. Konstitutivni modeli prije svega se temelje na pretpostavci kontinuuma, a svojstva materijala poput elastičnih konstanti mogu se opisati kao opružni elementi i amortizeri (prigušivač). Za parametre oštećenja koji se koriste u konstitutivnim modelima potrebna su mjerenja kao što su mjerenje brzine deformacije (u slučaju plastičnih ili neelastičnih deformacija), mjerenje polja naprezanja i otvaranja vrha pukotine i zone procesa loma (u slučaju loma) itd. [40, 41].

Raniji nedostaci koji mogu pomoći u definiranju kasnijih oštećenja mogu također biti od velikog značenja (npr. opseg pojave mikropukotina u betonu i početna anizotropija

materijala). Oni se u mehanici oštećenja opisuju kao unutarnje varijable. Oštećenja utječu na konstitutivno ponašanje, a promjene unutarnjih varijabli postaju osnovan zahtjev za senzore. Na primjer, u radu [40] opseg pojave mikropukotina u materijalu definira se kao varijabla unutarnjeg oštećenja te dobiva naziv "raspodjela gustoće mikropukotina". Kako bi se opisalo nastajanje i napredovanje ranijeg oštećenja, trebaju se definirati pravila razvoja; ta se pravila mogu opisati kao zakonitosti konstitutivnog oštećenja. Dobro je definirana korelacija između konstitutivnih materijala i varijabli oštećenja i tradicionalnih senzorskih mjerenja, kao što su mjerenja ekstenzometrom i mjerčem pomaka. Međutim, ranije nisu definirane nove senzorske tehnike koje se opisuju u nastavku.

4. Unutarnji i/ili površinski senzori

Tehnologije u kojima se koriste ETS senzori uključuju senzore izrađene od ugljikovih nanocjevčica [42], nanooksida, pijezelektrične keramike, optičkih vlakana [43] itd. Ovdje se ukratko prikazuje nekoliko ETS tehnologija. Kako bi se osigurala pravilna primjena za beton, potrebno je odrediti stadij razvoja senzora. U tablici 3. daje se sažeti prikaz senzorske tehnologije koja bi se mogla koristiti za razne nedostatke i mehanizme propadanja armiranog betona naznačene u tablici 1. U tablici 3. navodi se vrsta senzora, rezultirajuće mjerenje i karakteristike. Senzori koji se ovdje spominju mogu biti površinski ili unutarnji. Senzori mogu slati signale pomoću kontakta ili daljinskim upravljanjem. Osim toga, može se uočiti da je za senzorsku tehnologiju koja se ovdje spominje potrebna električna povezanost; zbog toga je vrlo važno upotrijebiti trajne komponente u konstrukcijama NCS koje se koriste u nepovoljnim uvjetima. Tim se senzorima može odrediti čvrstoća materijala tijekom i nakon njege, kao i deformacija konstrukcije. Rasponi i razine osjetljivosti iskazani u tablici 3. ne smiju se tumačiti kao informacije koje detaljno opisuju postojeću senzorsku tehnologiju. Te su informacije samo opća naznaka spomenutih razina. Slika 3. prikazuje osnovne naznake o betonskim konstrukcijama NCS koje se temelje na mogućim nedostacima betona te na dostupnim senzorskim tehnologijama. U nastavku se opisuju različite vrste senzora koji se mogu koristiti u betonskim konstrukcijama NCS.

Tablica 2. Mehaničko ponašanje kao indikator oštećenja materijala

Linearnoelastično	Hipoelastično	Hiperelastično	Viskoelastično	Plastično
Izotropno	Nelinearno	Velike deformacije	Ovisno o vremenu	Nepovratno
Neizotropno	Povratno	Gumeno elastično	Temperatura	Ovisno o brzini
Ortotropno	Izotropno/neizotropno	Rastezanje		

Tablica 3. Usporedba raznih ETS tehnologija

Vrsta senzora	Mjerenja	Područje/Osjetljivost	Poteškoće u primjeni
Optička vlakna	Temperatura, deformacija, korozija ili naprezanje	Do nekoliko tisuća mikrona, >300 °C [43-47]	Gustoća armature otežava njeno polaganje; osjetljivost na mehaničke vibracije tijekom ugradnje betona
Kompozitni premaz ugljikovim nanocjevčicama	Deformacija	Nepoznato na postojećim konstrukcijama [19]	Površinskim se premazom ne mogu utvrditi poteškoće u unutrašnjosti.
Pijezootporna vlakna	Naprezanje	Deformacija od 0,05 % [22-23]	Potrebni su konektori.
Piezoelektrični senzor na bazi akustičnih emisija	Energija akustičnih emisija, udaljenost	1,5 mJ, udaljenost 12 cm [53-54]	Dubina detekcije je upitna; također je upitan i raspoloživi raspon frekvencija.
Senzori obodnog tipa	Temperatura	do 1200 °C [56]	Samo za površinske naznake.
Polimerom modificirani samo-ispitujući beton	Deformacija	Potencijalno neograničeno [58]	Nepoznata je tolerancija na radioaktivnost, tolerancija na toplinu, podudarnost armature i preciznost u određivanju oštećenja betona.
Beton modificiran ugljikovim nanocjevčicama	Deformacija	Potencijalno neograničeno [60]	Trajnost
Elektrokemijski	Protok elektrona i kemijske promjene	[62]	Korozija armature i unutarnja kemija betona; preciznost zbog variranja uvjeta u betonu i okolini.
Koaksijalni kabeli	Deformacija i protok elektrona	Varira [65]	Korozija i pojava pukotina



Slika 3. Shematski prikaz primjene senzora u ocjenjivanju konstrukcija tipa NCS

4.1. Optička vlakna

Senzori koji se temelje na optici vlakana (eng. *Fiber optic* - FO) često se koriste za praćenje ponašanja konstrukcija zbog svoje visoke razine pouzdanosti, velike autonomije, jednostavnog postavljanja i izuzetne kakvoće mjerenja [43]. Optička se vlakna mogu koristiti bilo kao jedna nit ili u snopu; osim toga, vlakna se mogu podijeliti na kratka (diskretna) ili duga

(raspoređena). Ona se odlikuju dobrom osjetljivošću i rezolucijom te mogu mjeriti u mikronima. Uz to su otporna na relativno visoke temperature [44]. Međutim, za FO senzore otporne na visoke temperature često trebaju skupi materijali poput zlata. FO senzori često služe za mjerenje površine od 20 mm ili manje. Raspoređeni FO senzori koriste se za udaljenosti koje se mogu protezati i na više kilometara [45]. Ovisno o tipu, FO senzori se mogu koristiti za određivanje različitih fizikalnih parametara kao što su temperatura, tlak, deformacija, pomak, rotacija, magnetsko/električno polje i korozija. Ovisno o načinu funkcioniranja, ti se senzori mogu podijeliti kako slijedi: optički senzori na bazi intenziteta, točkasti senzori na bazi interferencije, senzori na bazi polarizacije te senzori tipa Bragg Grating [46]. Autori članka

[47] mjerili su deformacije u rasponu od 1000 do 3000 $\mu\epsilon$ za temperature do čak -253 °C.

FO senzori naročito su prikladni za betonske konstrukcije NCS jer na njih ne utječe električno zasićenje okoline. Na njih ne utječu ni kemijska djelovanja jer su u osnovi kemijski inertni. Međutim, ti se senzori ponekad vrlo teško mogu postaviti i instalirati na postojeće betonske konstrukcije NCS u zonama u kojima se ne može izravno doći do betona.

4.2. Obloge od kompozitnih ugljikovih nanocjevčica i modificirani beton

Obloge od kompozitnih ugljikovih nanocjevčica sastoje se od vrlo malih cjevčica sastavljenih od povezanih ugljikovih atoma. Veza između susjednih atoma ugljika je kovalentna (atomi dijele elektrone), a krajevi cjevčica mogu biti otvoreni ili zatvoreni. Atomi su pretežno povezani u šesterokutnom obliku s cjevčicama sa zatvorenim krajem koje imaju petokutni oblik u blizini krajeva [48]. Jednovaljčane cjevčice nose oznaku SWCNT (jednostjane ugljikove nanocjevčice); međutim, višestruke cjevčice mogu biti koncentrično položene jedna u drugu i tada se označavaju kao MWCNT (višestjane ugljikove nanocjevčice). Promjeri su nanometarskog reda veličine, a dužina može iznositi i do nekoliko centimetara. U usporedbi sa svim poznatim materijalima, ugljikove nanocjevčice imaju najveći odnos čvrstoće i težine, pa tako ukupna čvrstoća može iznositi čak i do 150 GPa [48]. Stoga one pojačavaju materijal u koji su ugrađene. Osjetljivost ugljikovih nanocjevčica varira ovisno o namjeni. Ugljikove se nanocjevčice mogu koristiti kao funkcionalni dodatak premazu koji se zatim nanosi površinski. Kao premaz, može se koristiti za otkrivanje deformacija koje se javljaju u podlozi na koju je premaz nanesen. To se događa zato što se elektronska struktura ugljikovih nanocjevčica mijenja kada se materijal širi i skuplja. U radu [20] autori navode da se pomoću SWCNT i fluorescentnog spektra mogu "otkriti aksijalne deformacije manje od 0,1%", što je sasvim dovoljno za velike predmete. Ograničavanje nanošenja ovog vrlo funkcionalnog premaza sustavno je za sve sustave za premazivanje, a radi se o postizanju dostatne veze između premaza i podloge. Odvajanje u smislu ljuštenja, ljuskanja ili osmotskog mjehuranja umanjuje korist od premaza impregniranog ugljikovim nanocjevčicama. Poznato je da premazi koji sadrže ugljikove nanocjevčice omogućuju pasivno mjerenje deformacija i to pomoću promjena u luminiscenciji koje označavaju stupanj deformacije premaza. Slično ovom postupku i postupku koji se provodi za pijezelektrične nanočestice, ugljikove nanocjevčice mogu se raspršiti unutar betonske mješavine, čime se omogućuje mjerenje deformacija. Jedna od prednosti ugljikovih nanocjevčica u odnosu na tradicionalne pijezeramike sastoji se u činjenici da imaju bolja pijezelektrična svojstva [42]. Iskustva nam pokazuju da je najveći problem u primjeni ugljikovih nanocjevčica taj što imaju sklonost prema koaguliranju, a to sprječava da se potpun rasprše po čitavoj matrici. Uočeno je da antikovalentne tehnike pogoršavaju mehanička svojstva ugljikovih nanocjevčica. Međutim, isto tako je uočeno da neke druge tehnike uspješno osiguravaju dugotrajnu suspenziju i raspršivanje nanocjevčica. S obzirom na to da su ugljikove nanocjevčice skupe, potrebno je za svaki projekt odrediti stupanj isplativosti primjene ugljikovih nanocjevčica na svim betonskim konstrukcijama koje se koriste na nuklearnim postrojenjima. Stoga bi se moglo zaključiti da će se ugljikove nanocjevčice vrlo vjerojatno koristiti za diskretno "krpanje" strateški važnih mjesta u modificiranim betonskim mješavinama.

4.3. Pijezootporna vlakna

Vlaknasti polimeri prvi su se put počeli upotrebljavati za pojačanje betona u pedesetim godinama prošlog stoljeća, a češće tri desetljeća kasnije [49]. Beton se dodatno može pojačati dodavanjem vlaknastog materijala s pijezelektričnim svojstvima (povećava se njegova čvrstoća i krutost), a istovremeno se na taj način poboljšava funkcionalnost samopraćenja stanja betona. Osim polimera, ti se materijali mogu sastojati od grafita, ugljika i čelika [49]. Kada se koriste u rasutom stanju, vlakna se pozicioniraju nasumce (drugim riječima, cilj je potpuno raspršiti vlakna unutar betona). Nasumično pozicioniranje vlakana omogućuje sveprisutno i izotropno pojačanje i ukrućivanje betona, a primjena pijezoopornog materijala omogućuje postizanje povoljnih svojstava samo-praćenja stanja [50]. U radu [51] Wang i Chung predlažu upotrebu pijezoopornih vlakana kao kompozita za premazivanje, pri čemu kao vezivo služi epoksidna smola. Kada se vlakna upotrijebe na ovakav način, ona su položena paralelno s ravninom tankog premaza. Mogu se upotrijebiti i kao senzorski sustav u kombinaciji s drugim pijezoopornim materijalima, te se u tom slučaju vlakna dužine 6 mm i bakrena gaza unose u materijal na bazi cementa [52]. U obzir se svakako treba uzeti i toplinska provodljivost, i to kako zbog različitosti materijala koji se mogu koristiti kao pijezootporna vlakna, tako i zbog visokih temperatura koje se mogu očekivati na mjestima primjene betonskih konstrukcija nuklearnih postrojenja. Prijenos topline kroz element može utjecati (pozitivno ili negativno) na ispuštanje topline u slučaju nesreće. Međutim, s obzirom na veličinu tih vlakana, ekspanzija materijala u betonu ponekad se treba ublažiti dodavanjem aeranata prilikom projektiranja betonske mješavine.

4.4. Pijezelektrične akustične emisije

Tehnike koje uključuju senzore za akustične emisije (AE) sastoje se od mjerenja elastičnih valova koji se iniciraju tijekom mehaničkog događaja - deformacije ili loma - relativno niske osjetljivosti [53-55]. Iako se radi o pasivnim sensorima, mrežom tih senzora može se pomoću triangulacije otkriti mjesto "događaja". Tradicionalni AE senzor sastoji se od pijezelektrične keramike ili kristala; koriste se međutim i spregnuti senzori. U radu [54] autori navode da pijezelektrični materijal nije kompatibilan s betonom u koji je unesen te da se bolji rezultati postižu primjenom spregnutih senzora. Navode, dakle, spregnuti senzor koji se sastoji od pijezelektričnih šipaka ugrađenih u beton. Cementna faza kompozita omogućuje nisku akustičnu impedanciju i dielektričnu konstantu, a ugrađena keramika omogućuje tradicionalne pijezelektrične efekte kojima se odlikuju slični pametni materijali. Senzori za akustične emisije često imaju uzak raspon frekvencija mjerenja, što ponekad nije u skladu s frekvencijom "mehaničkog događaja" betona pa se stoga vibracije teško mogu razlikovati od vibracija koje se javljaju tijekom normalnog rada postrojenja.

4.5. Senzori obodnog tipa

Kao termistor se mogu koristiti metalni oksidi u krutom stanju, i to zbog Arrheniusovog odnosa između temperature i električne provodljivosti. U prethodnom se eksperimentu, ti oksidi miješaju i prenose na supstrat gdje se sinteriraju pri temperaturi nešto iznad 1200 °C [56]. Na električna svojstva senzora utječu temperatura sinteriranja i sastav oksida. U svakom slučaju, uključivanjem ovih termistora dobivaju se vrijedne naznake o situaciji u unutrašnjosti betona i o površinskim temperaturama, što je važno za određivanje mogućnosti odgođenog nastajanja etringita ili pretjeranih temperaturnih razlika. Osim toga, senzori se mogu koristiti i kao vrlo tanki, nalijepljeni na površinu [57].

4.6. Samoispitujući beton

Deformacija se tradicionalno mjeri lijepljenjem ekstenziometra na površinu materijala. Samoispitujući beton omogućuje raspršivanje nanočestica s pijezelektričnim i/ili elektrostriktivnim svojstvima kroz betonski materijal [58]. Nanočestice se sastoje od različitih materijala kao što su pijezelektrični kristali, pijezelektrična keramika, kompozit sastavljen od keramike i pijezelektričnog polimera, grafit, ugljik i čelik [59]. Ovaj se materijal može koristiti kao dio betonske mješavine i u tu se svrhu dodaje tri do deset posto [22] od ukupne količine cementa. Zbog svoje sveprisutnosti u betonskoj komponenti, raspon mjerenja deformacije i osjetljivosti mogao bi se teoretski ograničiti samo ograničenjima materijala domaćina, u ovom slučaju betona. Nakon pucanja – što sprječava provodljivost - dolazi do potpunog gubitka ili, u najboljem slučaju, smanjenja osjetljivosti na deformaciju, tj. točnosti [60]. U slučaju deformacije očvrslog betona, mogu se izmjeriti električna svojstva betona (provodljivost/otpor) kako bi se odredila razina i vrsta deformacije. Za betonske konstrukcije nuklearnih postrojenja s velikom koncentracijom armature, gdje je potrebno odrediti deformaciju na temelju promjene električne provodljivosti, niska se tolerancija zadaje za postavljanje elektroda za ispitivanje provodljivosti materijala. Mjerni uređaj nije samo osjetljiv na deformacije već i na provodljivost armature sadržane u konstrukcijama nuklearnih postrojenja, što predstavlja problem u određivanju različitih uzroka promjene električnog otpora.

4.7. Elektrokemijski senzori

Kao što je već spomenuto, korozija armature je elektrokemijski proces [61]. Za taj je proces potreban razvoj korozijske ćelije, što uključuje anodnu zonu (u kojoj se gube elektroni), katodnu zonu (u kojoj se dobivaju elektroni), metalnu stazu (u slučaju betona, to je obično armatura) i elektrolitnu stazu (betonska matrica bez pasivnosti) [62, 63]. Senzori i senzorske tehnike koje se primjenjuju za otkrivanje korozije mogu biti površinske ili unutarnje i mogu uključivati različite postupke kao što su

otpor na potenciostatičku linearnu polarizaciju, galvanostatička pulsna polarizacija, potenciodinamička ciklična polarizacija, galvanostatička polarizacija i elektrokemijska impedancijska spektroskopija [64]. Ovisno o postupku, sensorima je potreban izravan pristup armaturi koja se analizira ili barem električna provodljivost čelika. Često je vrlo teško protumačiti rad elektrokemijskih senzora, pa se stoga treba izuzetno paziti pri analizi rezultata ispitivanja [64]. Tradicionalni elektrokemijski senzori nisu razvijeni za primjenu pri visokim okolnim temperaturama koje nalazimo u nekim dijelovima nuklearnih postrojenja; zato se u takvim slučajevima treba ili pojačati otpornost senzora ili se oni trebaju postaviti dalje od zone visokih temperatura.

4.8. Koaksijalni kabeli

Koaksijalni kabeli se upotrebljavaju u raznim konfiguracijama materijala, a obično se sastoje od dva sloja provodnog materijala od kojih je jedan vezan oprugom; između njih se nalazi jedan neprovodni materijal [65]. Takav se kabel se razlikuje od većine koaksijalnih kabela po svom spiralnom dijelu, jer mu taj dio omogućuje da djeluje kao senzor a ne kao jednostavniji odašiljač signala. Koristi se za otkrivanje pukotina i praćenje korozije na raznim dijelovima konstrukcije [66]. Za otkrivanje pukotina senzor koristi prije svega električnu reflektometriju u vremenskoj domeni (engl. *Electrical time-domain reflectometry*, ETDR) kojom se dobivaju naznake o deformacijama [67]. Deformacije se otkrivaju tako što na mjestima deformacija duž kabela dolazi do širenja dijelova opružnog kabela. Senzor se također postavlja u blizini betonske armature na mjestima gdje se može očekivati pojava korozije. Korozija se javlja na kabelu isto kao i na armaturi. Električna provodljivost kabela se smanjuje na mjestima pojave točkastih oštećenja, što je znak da je došlo do korozije. Potrebno je napomenuti da osjetljivost i rezolucija senzora ovisi o dužini kabela. Očekuje se da će kabeli za većinu betonskih konstrukcija nuklearnih postrojenja biti vrlo dugački, što će umanjiti osjetljivost i rezoluciju senzora. Osim toga, nema naznaka da bi se mogla odrediti lokacija točkastih pukotina na koaksijalnim kabelima, jer su zapravo uočene samo smetnje u signalu. Međutim, kako korozija betonske armature u velikoj mjeri ugrožava sigurnost AB konstrukcija, daljnji istraživački rad u tom području mogao bi dovesti do znatnih poboljšanja.

5. Stanje tehnologije i rasprava

U tablici 3. navode se vrste senzora, rezultirajuće mjerenje i karakteristike. Senzori mogu biti površinski ili unutarnji. Senzori mogu slati signale pomoću kontakta ili daljinskim upravljanjem. Potrebno je također napomenuti da je za spomenutu senzorsku tehnologiju potrebna električna povezanost. Zato je izuzetno važno za ugradnju u konstrukcije nuklearnih postrojenja odabrati vrlo robusne komponente jer su te konstrukcije izložene vrlo nepovoljnim utjecajima okoline. Tim se sensorima može odrediti čvrstoća materijala tijekom i nakon njege, isto kao i deformacija

konstrukcije. Rasponi i razine osjetljivosti iskazani u tablici 3. ne smiju se tumačiti kao informacije koje detaljno opisuju postojeću senzorsku tehnologiju već samo kao opće naznake tih razina. Slika 3. prikazuju osnovne naznake o betonskim konstrukcijama nuklearnih postrojenja, moguće nedostatke betona i dostupne senzorske tehnologije

Neki su senzori napravljeni od robusnih materijala koji se mogu diskretno ugraditi u beton te djelovati kao funkcionalna punila ravnomjerno raspršena u betonu. Međutim, kao što smo već napomenuli, neki od tih senzora za sada se mogu aktivirati samo kada su spojeni kabelima. Stoga se senzori i njihovi spojevi trebaju strateški postaviti u zone koje su udaljene ili dostatno zaštićene od visokih temperatura i zračenja. Nasreću, područja s visokom razinom zračenja nalaze se samo u dvije zone betonskih konstrukcija nuklearnih postrojenja. Čak i tamo ima prostora bez velikih opterećenja i ekstremnih temperaturnih uvjeta. Područja s visokim razinama zračenja su podnožje posude nuklearnog reaktora, zaštitni zidovi i spremnici suhog radioaktivnog otpada [68].

6. Zaključak

Za betonske konstrukcije u nuklearnim postrojenjima trebaju se provoditi napredna nerazorna ispitivanja i primjenjivati inovativne senzorske tehnologije, i to zbog zahtjevnih okolnosti kao što su primjena masivnih materijala i velike količine

armature, te mogućeg izlaganja visokim temperaturama i zračenju. U ovom se radu obrađuju novije površinske i unutarnje senzorske tehnologije (ETS) za potrebe nuklearne industrije. Analiziraju se senzorske tehnologije poput optičkih vlakana, kompozitnih premaza od ugljikovih nanocjevčica, pijeootpornih vlakana, pijeoelektričnih akustičkih emisija, senzora obodnog tipa, samoispitujućeg modificiranog betona, elektrokemijskih senzora i koaksijalnih kabela. Topološke prednosti ovih senzora proizlaze iz činjenice da se mogu koristiti na površini ili u unutrašnjosti materijala, da omogućuju periodično ili kontinuirano praćenje, te da mogu biti ili fizički dostupni ili upravljani daljinskim uređajem. Međutim, za sadašnju primjenu u nuklearnim postrojenjima u obzir se trebaju uzeti dodatne okolnosti kao što je primjerice potreba da senzorske metode budu robusne, tj. usklađene s uvjetima okoline. U zaključku se ipak može reći da postoje velike potencijalne mogućnosti za primjenu mnogih ETS senzora u posebnim uvjetima kao što su oni koji prevladavaju u betonskim konstrukcijama koje nalazimo u nuklearnim postrojenjima.

Zahvala

Stavovi, mišljenja i rezultati objavljeni u ovom radu isključiva su odgovornost autora i ne predstavljaju službeni stav ili mišljenje organizacija kojima su pridruženi. Autori zahvaljuju Američkom institutu za beton na dodjeli potpore.

LITERATURA

- [1] Naus, D.J.: Report No. ORNL/TM-2007/191, Inspection of Nuclear Power Plant Structures – Overview of Methods and Related Applications. Oak Ridge (TN); 2007.
- [2] Power Reactor Information System (PRIS) [Internet]: Geneva (CH): International Atomic Energy Agency (IAEA). [cited July 2018]. Available from: <https://www.iaea.org/pris/>.
- [3] ACI Committee 228: ACI 228.2R, Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2013.
- [4] Scott, D.: Internal Inspection of Reinforced Concrete for Nuclear Structures Using Shear Wave Tomography. *Energy Convers and Manag.*, 74 (2013), pp. 582-586, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.041>
- [5] Muenow, R.A.: Field Proven NDT Methods for Evaluation of Damage and Repair of Nuclear Facilities. *Nuclear Plant Journal*, 6 (1988), pp. 81-82, 89.
- [6] Kim, Kim, Seo, et al.: Feasibility Study of the IE-SASW Method for Nondestructive Evaluation of Containment Building Structures in Nuclear Power Plants. *Nucl Engin and Des*, 219 (2002), pp. 97-110, [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00234-0](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00234-0)
- [7] Ghasr, T., LePape, Y., Scott, D.B., et al.: Holographical Microwave Imaging of Corroded Steel Bars in Concrete. *ACI Mater J.*, 112 (2015) 1, pp. 115-124.
- [8] Kee, Fernandez-Gomez, Zhu.: Evaluating surface-breakage cracks in concrete using air-coupled sensors. *ACI Mater J.*, 108 (2011) 5, pp. 558-565.
- [9] Bhardwaj, M.C.: Noncontact Ultrasonic Testing and Analysis of Materials. In: Schwartz M, editor. *Smart Materials*. Boca Raton (FL): CRC Press; 2009: 9.3.
- [10] Clayton, D., Hileman, M.: *Light Water Reactor Sustainability Nondestructive Evaluation for Concrete Research and Development Roadmap*. Oak Ridge (TN): Oak Ridge National Laboratory; 2012, <https://doi.org/10.2172/1051451>
- [11] La Plaine Cedex Association de Normalisation (AFNOR). *Methodology for Qualification on Non-Destructive Tests*. La Plaine Cedex (FR): AFNOR; 2005.
- [12] *Non-Destructive Tests on Hardened Concrete*. Geneva (CH): International Standards Organization (ISO); 2004.
- [13] Technical Committee B/517. *Concrete - Determination of Ultrasonic Pulse Velocity*. Brussels (BE): British Standards Institute (BSI); 2004.
- [14] Nuclear Energy Agency (NEA). *Electrochemical Techniques to Detect Corrosion in Concrete Structures in Nuclear Installations*. Vienna (Austria): NEA; 2002.
- [15] Federal Highway Administration (FHWA). *Prediction of Chloride Penetration in Concrete*. McLean (VA): FHWA; 2001.
- [16] ASTM Committee C09. *ASTM C597-16 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2016.
- [17] ASTM Committee C09. *ASTM C1740-16 Standard Practice for Evaluation the Condition of Concrete Plates Using Impulse-Response Method*. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2016.

- [18] Sreekala, R., Muthamani, K.: Structural Applications of Smart Materials. In: Schwartz M, editor. Smart Materials. Boca Raton (FL): CRC Press; 2009. 4.
- [19] Withey, P.A., Vemuru, V.S., Bachilo, S.M., Nagarajaiah, S., Weisman, R.B.: Strain Paint: Noncontact Strain Measurement Using Single-Walled Carbon Nanotube Composite Coatings. *Nano Lett, Am Chem Soc.*, 12 (2012), pp. 3497-3500, <https://doi.org/10.1021/nl301008m>
- [20] Li, H., Xiao, H., Ou, J.: A Study on Mechanical and Pressure-Sensitive Properties of Cement Mortar with Nanophase Materials. *Cem and Concr Res.*, 34 (2004), pp. 435-438, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.08.025>
- [21] Kim, D.J., Lee, C., Chang, H., et al.: Embedded Piezoelectric Sensor-Based Real-Time Strength Monitoring during Curing Process of Concrete. SPIE 7981, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. April 14, 2011; San Diego, CA.
- [22] Shen, B., Yang, X., Li, Z.: A Cement-Based Piezoelectric Sensor for Civil Engineering Structure. *Materials and Structures*, (2006), pp. 1-5.
- [23] Suchanek, W.L., Riman, R.E.: Intelligent Synthesis of Smart Ceramic Materials. In: Schwartz M, editor. Smart Materials. Boca Raton (FL): CRC Press; 2009. 2.
- [24] Yang, M., Dai, J.: Review on Optical Fibre Sensors with Sensitive Thin Films. *Photonic Sensors*, 2 (2012) 1, pp. 14-28.
- [25] Abu-Yosef, A.E., Pasupathy, P., Wood, S.L., et al.: Detection of Multiple Corrosion Thresholds in Reinforced Concrete Structures Using Passive Sensors. *Smart Structures*, In Gyekenyesi AL, editor. SPIE 8347, Smart Structures. SPIE. April 5, 2012, <https://doi.org/10.1117/12.915164>
- [26] Yao, Y., Tung, S.T.E., Glisic, B.: Crack Detection and Characterization Techniques - An Overview. *Struct. Control and Health Monitoring*, 21 (2014), pp. 1387-1413, <https://doi.org/10.1002/stc.1655>
- [27] Renshaw, J., Guimaraes, M., Scott, D.B.: Thermographic Inspection of Massive Concrete Structures. *Proceedings of the 2013 QNDE Conference*, (2013), pp. 978-984.
- [28] ACI Committee 201: ACI 201.1R-08, Guide for Conducting a Visual Inspection of Concrete in Service. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2008.
- [29] American Concrete Institute (ACI): Concrete Terminology, ACI CT-13. Farmington Hills (MI): ACI; 2013.
- [30] Institution of Structural Engineers (ISE). Structural Effects of Alkali-Silica Reaction. London (UK): ISE, SETO Ltd.; 1992.
- [31] ACI Committee 515: ACI 515.2R-13 Guide to Selecting Protective Treatments for Concrete. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2013.
- [32] ACI Committee 222: ACI 222R-10, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion (Reapproved 2010). Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2010.
- [33] NACE TG 356: Stray-Current Induced Corrosion in Reinforced and Prestressed Concrete Structures. Houston (TX): NACE International; 2010.
- [34] NACE TG 400: SPO112, Corrosion Management of Atmospherically Exposed Reinforced Concrete Structures. Houston (TX): NACE International; 2017.
- [35] Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D.: Concrete. Upper Saddle River (NJ): Pearson Education, Inc.; 2004.
- [36] ACI Committee 349: ACI 349.3R-18, Report on Evaluation and Repair of Existing Nuclear Safety-Related Concrete Structures. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2018.
- [37] William, K., Xi, Y., Naus, D., Graves, L.H.: Review of the Effects of Radiation on Microstructure and Properties of Concretes Used in Nuclear Power Plants. Washington DC (USA): US Nuclear Regulatory Commission (USNRC); 2013.
- [38] Fillmore, D.L.: Report INEEL/EXT-04-02319, Literature Review of the Effects of Radiation and Temperature on the Aging of Concrete. Idaho Falls (ID): NEEL; 2004.
- [39] U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC): U.S. Nuclear Regulatory Commission Regulations: Title 10, Code of Federal Regulations. Washington, DC (USA): USNRC; 2014.
- [40] Barbero, E.J., De Vivo, L.: A Constitutive Model for Elastic Damage in Fibre-Reinforced PMC Laminæ. *International Journal of Damage Mechanics SAGE*, 10 (2001), pp. 73-93, <https://doi.org/10.1106/6PQ6-31JW-F69K-74LU>
- [41] Budiansky, B., O'connell, R.J.: Elastic Moduli of a Cracked Solid. *International Journal of Solid Structures*, 12 (1975) 2, pp. 1281-1297.
- [42] Pammi, S., Brown, C., Datta, S., et al.: Concepts for Smart Nanocomposite Materials. *Smart Materials, Structures, and Systems*, SPIE 5062, pp. 629-636, 2003.
- [43] Fallon, R.W., Zhang, L., Everall, L.A., et al.: All-Fibre Optical Sensing System: BG Sensor Interrogated by Long-Period Grating. *Measurement Science Technology*, 9 (1998) 12, pp. 1969-1973.
- [44] Glisic, B.: Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring. West Sussex (UK): John Wiley & Sons Ltd., 2007, <https://doi.org/10.1002/9780470517819>
- [45] Mrad, N., Li, H.: Fibre Optic Systems: Optical Fibre Sensor Technology. In: Schwartz M, editor. Smart Materials. Boca Raton (FL): CRC Press; 2009. 14.1.
- [46] Huston D. Structural Sensing, Health Monitoring, and Performance Evaluation. Boca Raton (FL): CRC Press / Taylor and Francis Group, LLC; 2011.
- [47] Nunes, Olivieri, Kato, Luiz, Braga: FBG sensor multiplexing system based on the TDM and fixed filters approach. *Science Direct, Sensor and Actuators*, 138 (2007), pp. 341-349, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.05.009>
- [48] Wille, K., Loh, K.J.: Nanoengineering Ultra-High-Performance Concrete with Multiwalled Carbon Nanotubes. *Transportation Research Records*, 2142 (2010), pp. 119-126, <https://doi.org/10.3141/2142-18>
- [49] ACI Committee 440: ACI 440R-07, Report on Fibre Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2007.
- [50] Han, B., Yu, X., Ou, J.: Self-Sensing Concrete in Smart Structures. New York (NY): Elsevier Inc.; 2014.
- [51] Wang, X., Chung, D.D.L.: Short Carbon Fibre Reinforced Epoxy Coating as a Piezoresistive Strain Sensor for Cement Mortar. *Science Direct, Sensors and Actuators*, 71 (1998), pp. 208-212, [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(98\)00187-3](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(98)00187-3)
- [52] Han, B., Guan, X., Ou, J.: Electrode Design, Measuring Method and Data Acquisition System of Carbon Fibre Cement Paste Piezoresistive Sensors. *Science Direct, Sensors and Actuators*, 135 (2006), pp. 360-369, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.08.003>
- [53] Sakamoto, W.K., Higuti, R.T., Tiago, M.M.: Piezoelectric Composite Film for Acoustic Emission Detection. *Ultrasonics Symp, IEEE*, pp. 1487-1490, 2009, <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2009.5441422>
- [54] Marin-Franch, P., Martin, T., Tunnicliffe, D.L., et al.: PTCa/PEKK Piezo-Composites for Acoustic Emission Detection. *Science Direct, Sens and Actuators*, 99 (2002) 3, pp. 236-243.

- [55] Qin, Peng, Ren, et al.: Application of cement-based piezoelectric composites in acoustic emission detection for concrete. In: Jinsong L, Anand K, Asundi, et al., editors. Proceedings of SPIE, Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering; 7493 (2009), pp. 1-9.
- [56] Park, K., Bang, D.Y.: Electrical Properties of Ni-Mn-Co-(Fe) Oxide Thick-Film NTC Thermistors Prepared by Screen Printing. *J. Mater Sci Mater Electronics*, 14 (2003), pp. 81-87, <https://doi.org/10.1023/A:1021900618988>
- [57] Zhang: Piezoelectric Paint Sensor for Real-time Structural Health Monitoring. In: Tomizuka M, editors. Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, 5765 (2005), pp. 1095-1103.
- [58] Agari, Y.: Functionally Graded Polymer Blend. In: Schwartz M, editor. *Smart Materials*. Boca Raton (FL): CRC Press, 2009. 3.
- [59] Kholkin, A.K., Kiselev, D.A., Kholkina, L.A., et al.: Piezoelectric and Electrostrictive Ceramics Transducers and Actuators. In: Schwartz M, editor. *Smart Materials*. Boca Raton (FL): CRC Press; 2009. 9.1.
- [60] Pacheco-Torgal, F., Gonzalez, J., Jalali, S.: Sustainable Monitoring of Concrete Structures: Strength and Durability Performance of Polymer-Modified Concrete. *International J of Sustainable Energy*, pp. 1-5, 2011.
- [61] Muralidharan, S., Ha, T.H., Bae, J.H., et al.: A Promising Potential Embeddable Sensor for Corrosion Monitoring Application in Concrete Structures. *Measurement*, 40 (2006), pp. 600-606, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2006.09.008>
- [62] Vennesland, Ø., Raupach, M., Andrade, C.: RILEM TC 154-EMC, Electrochemical Techniques for Measuring Corrosion in Concrete – Measurements with Embedded Probes. *Materials and Structures*, 40 (2007), pp. 745-758, <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9219-4>
- [63] Poursaeed, A., Weiss, W.J.: An Automated Electrical Monitoring System (AEMS) to Assess Property Development in Concrete. *Automation in Constr.*, 19 (2009), pp. 485-490, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.12.016>
- [64] Andrade, C., Sanchez, J., Castillo, A., et al.: Interpretation of Corrosion Monitoring from Embedded Sensors. In: 15th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, SHMII-5; pp. 1-7, 2011.
- [65] Muchaidze, I., Pommenrenke, D., Chen, G.: Steel Reinforcement Corrosion Detection with Coaxial Cable Sensors. Tomizuka M, Yun CB, Giurgiutiu V, et al., editors. Proceedings of SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems (79811L-1), 7981 (2011), <https://doi.org/10.1117/12.879770>
- [66] Greene, G.G., Belarbi, A., Chen, G., et al.: Distributed Coaxial Cable Crack Sensors for Crack Mapping in RC. Tomizuka M, editor. Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Bellingham, 5765 (2005), pp. 407-418, <https://doi.org/10.1117/12.600143>
- [67] Sun, S., Pommerenke, D., Drewniak, J.L., et al.: Signal Loss, Spatial Resolution, and Sensitivity of Long Coaxial Crack Sensors. Shih-Chi Liu, editor. Proceedings of SPIE, Smart Structures and Sensors, 5391 (2012), pp. 786-797, <https://doi.org/10.1117/12.540033>
- [68] Electric Power Research Institute (EPRI): 1023006, Advanced Nuclear Technology: Embedded Sensors in Concrete. Palo Alto (CA): EPRI, 2011.