

УДК 693.620

**УМНЫЕ БЕТОНЫ. АКТУАЛЬНОСТЬ НАПРАВЛЕНИЯ.
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ**

В. Е. Ваганов, к.т.н., доц., С. Ю. Петрунин, асп., Е.В. Смирнов студ.

*Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
г. Владимир, Россия.*

В настоящее время бетонные и железобетонные конструкции находят все более широкое применение в различных областях техники. Новые области применения бетона потребовали и новых знаний о его свойствах. Наряду с изучением механических свойств в последние годы большое внимание уделяется электротехническим свойствам бетонов, и как следствие этого были начаты работы по созданию бетонов с заранее заданными электрическими характеристиками.

Обычный бетон в определенных температурно-влажностных условиях обладает способностью проводить электрический ток, однако это его свойство является не стабильным. Кроме того, в большинстве случаев электропроводность обычного бетона рассматривается как вредная, так как с ней связана электрокоррозия арматуры в железобетонных конструкциях под воздействие блуждающих токов. В ряде случаев эту способность пытались использовать для целей заземления некоторых строительных конструкций, работающих под воздействием электрического тока. Последнее возможно лишь в том случае если бетон является стабильным проводником тока. Однако при сезонных колебаниях температуры и влажности электрическое сопротивление обычного бетона меняется на 6-8 порядков. Объясняется это ионным характером проводимости. При насыщении бетона водой происходит переход легкорастворимых компонентов цементного камня в жидкую фазу и он становится полупроводником с низким удельным электрическим сопротивлением. Таким образом, попытки использовать проводящие свойства бетона во влажном состоянии не имели большого практического успеха. Характерная особенность ранее выполненных работ заключалась в том, что бетон рассматривался с электрической точки зрения как нечто единое без учета его химического и фазового состава, микро и макроструктуры, особенностей физико-химических процессов, приводящих к его формированию как материала.

В основу ведущихся в настоящее время исследований положен иной принцип получения как токопроводящих, так и изоляционных бетонов. Для электропроводящих бетонов – это выявление токопроводящей добавки, изменяющей свойства бетона в сторону повышения его электропроводности и, во-вторых, получение на ее основе композиционного материала - специального бетона со всеми характерными качествами проводника электрического тока. Электропроводящие бетоны могут найти свое применение в различных областях строительства: панели стен и перекрытий,

полы, кровли с внутренним водостоком, фундаменты опор линий ЛЭП, электроотопительные элементы зданий и прочее.

Другой областью использования электропроводности бетонов является разработка на их основе так называемых «смарт» или «умных» бетонов. Любая конструкция из бетона рано или поздно претерпевает различного рода структурные нарушения, которые либо заложены в исходной конструкции в виде различного рода микродефектов, участков избыточных локальных напряжений. В процессе эксплуатации такого рода участки становятся очагами образования микротрещин. Со временем под воздействием внешних нагрузок эти микротрещины увеличиваются в размерах в конечном итоге происходит их слияние и образование магистральных трещин и соответственно катастрофическое разрушение конструкции. Очевидно, что в ряде случаев, возможно, предотвратить разрушение, если заранее прогнозировать места образования микронесплошностей. В настоящее время существуют различные методики позволяющие контролировать качество бетонных конструкций – это так называемое неразрушающие методы контроля. К их числу относятся:

- акустический - в основном позволяет контролировать поверхностные слои, требует специального оборудования, высокую квалификацию оператора, отсутствует возможность постоянного контроля;
- ультразвуковой метод в целом является достаточно эффективным способом контроля дефектности по сути любых материалов, но в то же время требует специального оборудования и высокой квалификации персонала особенно при интерпретации результатов анализа;
- радиография метод также требует специального оборудования, соблюдения мер безопасности и имеет свои ограничения.
- Безусловно, все выше перечисленные методы имеют свои достоинства и недостатки и вместе с тем активно применяются для неразрушающих методов контроля бетонных и других конструкций. В качестве общего недостатка указанных методов следует отметить эпизодичность и выборочность контроля конструкций.

Нанотехнологически модифицированные сенсоры на основе цемента будут иметь успешное развитие по отношению к традиционно используемым (тензодатчики, акселерометры) для динамического мониторинга и соответственно обладать возможностью обратного влияния на структуру. Эта концепция основана на превращениях самой структуры композита в бесконечное множество потенциальных сенсоров приводя, таким образом, к увеличению чувствительности объема материала до максимально возможных значений. Такая взаимосвязь между сенсорами и структурой невозможна с традиционно контактными сенсорами, которые всегда внешне или внутренним образом устанавливаются на контролируемую конструкцию. Другим существенным отличием сенсоров на основе цемента может являться их значительно больший срок жизни. Выше отмеченные особенности становятся крайне актуальными вследствие современных тенденций постоянного мониторинга конструкций работающих в условиях агрессивных воздействий или трудно доступных местах (дамбы).

Методы контроля основанные на электропроводящих свойствах бетонов (electrical resistance tomography ERT)

Известно, что бетоны представляют собой композиционные материалы, структура которых включает гидратные фазы цемента с размером частиц 1-100 нм, зерна исходного цемента, химические и минеральные добавки, наполнители и заполнители. Большинство недавних исследований по использованию принципов нанотехнологии в бетоне было сосредоточено на попытках структурирования цементных материалов и изучения механизмов их разрушения. Установлено, что введение в бетонную смесь наноразмерных частиц оказывает существенное влияние на свойства бетона. Так, применение наносиликатов или углеродных наноструктур в виде: нановолокон (УНВ); нанотрубок (УНТ) или астраленов, позволяет не только заметно улучшить упаковку его составляющих, тем самым значительно снизить пористость и повысить в конечном итоге прочность и другие свойства, например морозостойкость, но и контролировать реакции образования и превращений гидросиликатов кальция (C-S-H гель), ответственных за обеспечение долговечности цементного камня [1-4].

В настоящее время существует огромное количество различного рода публикаций [5,6] в том числе обзорного характера посвященным исследованию углеродных наноструктур (УНС) и их применениям в различных отраслях. Интерес к такого рода структурам, в первую очередь обусловлен их уникальными физико-механическими свойствами: модуль Юнга отдельной нанотрубки составляет 1,8 ТПа; высокая электропроводность в зависимости от хиральности; высокое аспектное отношение ($\gg 500$). Последний параметр является чрезвычайно важным для достижения эффекта электропроводности даже при минимальных концентрациях не более 0,1 вес.%. Углеродные нанотрубки также обладают электромеханическими свойствами. Под воздействием механических напряжений происходит изменение их электропроводности.

Вместе с тем применение УНС в строительных материалах не получало активного развития по ряду причин. В первую очередь это связано с их высокой стоимостью. Однако ситуация на рынке УНС с каждым годом радикально меняется. Происходит постоянное увеличение объемов их производства, совершенствование технологических способов их получения, что также приводит к снижению их себестоимости. В последние годы проводятся активные исследования по получению УНС с использованием более дешевых исходных реагентов. Таким образом, можно ожидать, что в дальнейшем применение УНС не будет приводить к значительному удорожанию стоимости бетонов как конечного товарного продукта. Кроме экономических аспектов использования УНС в строительных материалах в качестве многофункциональных добавок существуют также технические проблемы обусловленные склонностью к агломерированию исходных УНС. Существуют различные способы решения данной проблемы в зависимости от дальнейших требований к получаемым композитам. В работе [7] исследованы различные способы обработки УНТ с целью получения тензочувствительного

композита на основе цемента. В таблице 1 представлены результаты определения изменений электросопротивления в зависимости от приложенной нагрузки на образец и от способа обработки УНТ. Представленные результаты свидетельствуют, что обработка УНТ в поверхностно-активных растворах значительно снижает чувствительность сенсорной системы, в отличие от обработки в смеси кислот. При этом обработка в ПАВах обеспечивает максимальное повышение прочности. Таким образом, при разработке сенсорных систем на основе цементных вяжущих необходимо четко представлять какие требования наиболее важны для данной конструкции.

Таблица 1

Сравнение изменения электрического сопротивления CNT/цементном композите с различной концентрацией CNT и различной приложенной нагрузкой

УНТ/цементный композит	Изменение сопротивления (при нагрузке 5,2 МПа)	Изменение сопротивления (при нагрузке 8,6 МПа)
Цементный камень	0 %	0 %
Цементный композит с УНТ, $C_{УНТ}=0,06\%$, весовых (метод 1)	8,8 %	10,3 %
Цементный композит с УНТ, $C_{УНТ}=0,1\%$, весовых (метод 1)	9,4 %	11,4 %
Цементный композит с УНТ, $C_{УНТ}=0,06\%$, весовых (метод 2)	$\approx 5,0 \%$	$\approx 7,2 \%$

Существуют различные методы для неразрушающего контроля образования внутренних напряжений и трещин основанных на электропроводности бетонов. К числу наиболее распространенных и достаточно хорошо изученных следует отнести томографию электрического сопротивления [8-11]. Существуют различные способы организации подвода электрического тока и регистрации ответных сигналов, но в их основу составляют двух и четырех пробные методы, схематически представленные на рисунке 1.

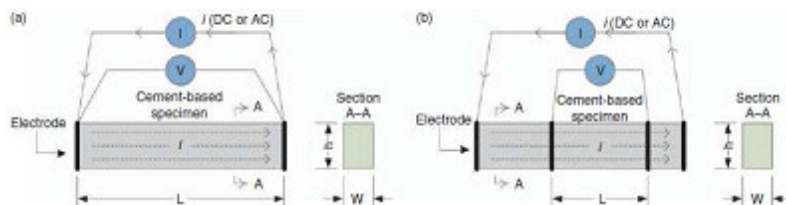


Рис. 1. Схемы измерения проводимости основанные на а) двух- точечном и б) четырех -точечном подводе электрического тока.

В первом случае для подвода электрического тока и снятия полезного сигнала используется только два контакта. В четырех пробном методе используются четыре электрических контакта на образце, из которых два применяются в качестве подающих напряжение, а два в качестве регистрирующих. Данный способ является более точным, поскольку измеряемое сопротивление не включает контактное сопротивление. Кроме того измерение проводимости может реализовываться при воздействии как переменного (alternating current AC) так и постоянного (direct current DC) тока. AC технология более надежная технология для неразрушающего мониторинга бетонов, однако, требует более сложного оборудования. При этом мониторинг электрической проводимости с использованием DC измерений, даже в случае применения многоканальных измерений может быть легко реализован с использованием простого оборудования, однако приложенное электрическое поле вызывает в образце поляризацию [12,13].

Поляризация может происходить как внутри бетона, так и на межфазных границах и местах контактов подвода электрического тока. Физической основой возникновения поляризации в диэлектриках (бетонах) является ионная проводимость. Данный эффект относится к термически активируемым процессам. При комнатных температурах процесс поляризации происходит в 5-8 раз активнее, чем деполяризация. Это связано с захватом ионов. При введении в состав углеродной фибры поляризация происходит значительно быстрее, чем обратный процесс. Это обусловлено различным типом изменением проводимости от ионной к дырочной. Поляризационное поле имеет противоположную направленность приложенному полю, при этом величина поляризации увеличивается с продолжительностью измерения. Это явление усложняет процесс измерения и интерпретацию полученных результатов. Приложение механической нагрузки уменьшает продолжительность периода, когда происходит поляризация, снижает величину данного эффекта в обоих способах измерений. Аналогичное снижение влияния поляризации наблюдается при введении в состав электропроводящей фибры [11,14]. Степень влияния поляризации также различается в двух и четырех пробных методах.

Физическую основу рассматриваемого метода относительной проводимости для регистрации локальных напряжений и микротрещин составляет пьезочувствительность материалов.

Если сопоставить данные для относительной проводимости C/C_0 с кривой деформация-напряжение можно установить корреляцию между образованием трещины в бетоне и изменением относительной проводимости. Относительная проводимость определяется по следующей формуле:

$$\Delta C / C_0 = \frac{C_t - C_0}{C_0}$$

Где ΔC изменение в проводимости $(\Omega \text{ m})^{-1}$

C_0 начальная проводимость $(\Omega \text{ m})^{-1}$

C_t – проводимость при испытании во время t $(\Omega \text{ m})^{-1}$

Дифференциальное изменение проводимости может быть определено как:

$$\frac{\Delta C_t}{C_t} = \frac{C_t - C_{t-\Delta S}}{C_t}$$

Где C_t значение проводимости при испытании во времени t ($\Omega \text{ m}$)⁻¹

$C_{t-\Delta S}$ значение проводимости при испытаниях во время $t-\Delta S$ ($\Omega \text{ m}$)⁻¹

ΔC_t – изменение проводимости образца со скоростью ΔS ($\Omega \text{ m}$)⁻¹

На рисунке 2 представлены зависимости напряжение-деформация и относительная электропроводность от степени деформации, на которых можно наблюдать взаимосвязь между образованием первых микротрещин и скачком в изменении относительной электропроводности обусловленной их появлением в бетоне с добавками полимерных и углеродных волокон.

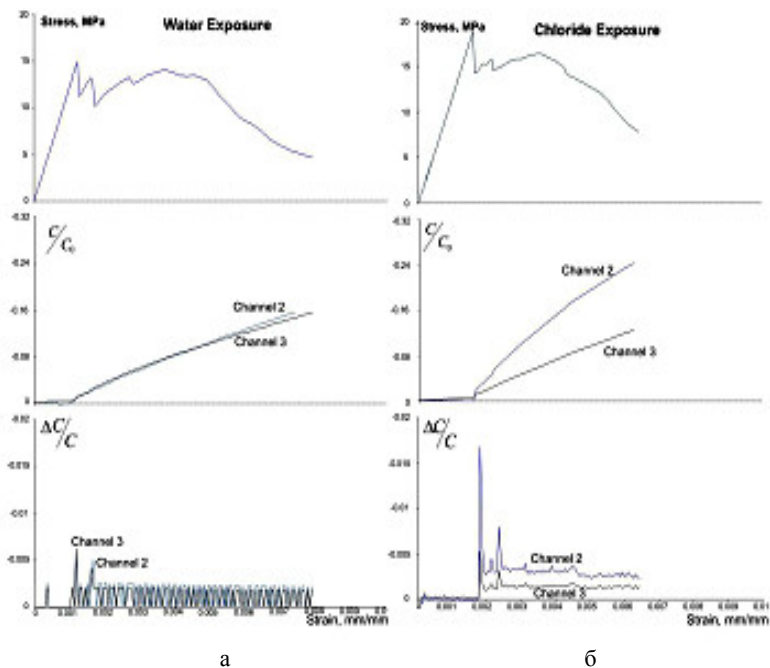


Рис. 2. Характеристические зависимости напряжение-деформация и относительная проводимость (обратная шкала) CNF-PVA в цементной основе после 245 часов выдержки в а) вода и б) 2% раствор NaCl

По сути, аналогичные изменения в электропроводности наблюдаются и на образцах модифицированных также углеродными нанотрубками и полимерными волокнами.

С целью усиления наблюдаемых эффектов изучение механических и электрофизических свойств проводилось после выдержки изучаемых образцов в воде и в растворе NaCl.

Электрическая импедансовая томография (electrical impedance tomography EIT)

Выше приведенные методы, основанные на измерении электрической проводимости имеют определенные ограничения. Например, они не обеспечивают локальности измерений, а носят усредненный интегральный характер.

EIT технология была разработана Tsung-Chiu Hou в Мичиганском университете [15]. Ее основу составляют измерения и картирование внутренних полей механических напряжений в объеме и на поверхности образцов при приложении к их поверхностям внешних электрических напряжений. Концептуально, EIT способ подобен методу ультразвуковой томографии, основанный на свойстве поглощения волн структурными элементами. Применительно к EIT области с различной напряженностью образца за счет эффекта пьезосопротивления будут иметь различную проводимость. Соответственно трещины на изображении будут отображаться как наиболее темные места. В принципе данный метод позволяет изучать любые материалы на основе цемента, в том числе дополнительно усиленные различного рода фиброй.

На рисунке 3(а) представлена схема реализации метода EIT бетонных конструкций.

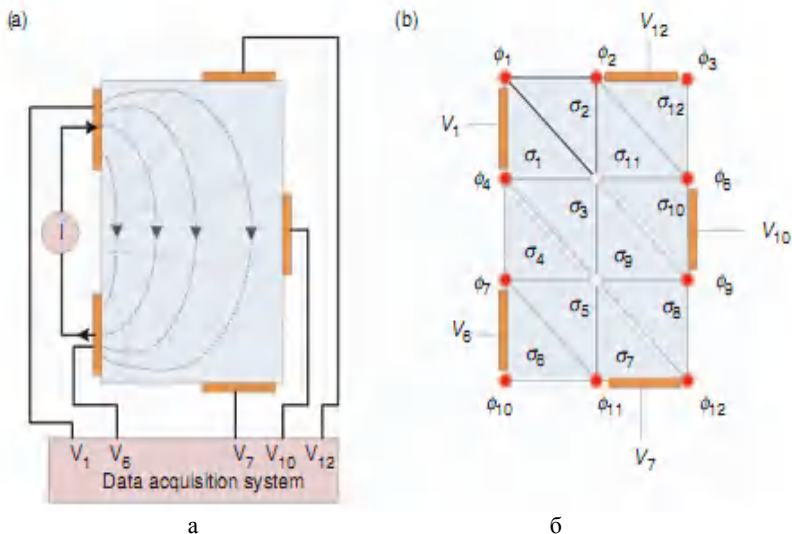


Рис. 3. (а) Схема измерения параметров для построения карты проводимости; (б) постановка задачи расчета карты проводимости методом конечных элементов.

Значение электрического тока Ω внутри плоского тела может быть моделировано уравнением Лапласа

$$\nabla \cdot [\sigma(x, y) \nabla \varphi(x, y)] = I(x, y)$$

Где σ , φ и I являются соответственно проводимостью, электрическим потенциалом и током соответственно в точке (x, y) . Поскольку ток приложен только на границе образца, уравнение с правой части будет равно нулю. Для известного распределения проводимости можно, точно рассчитать электрический потенциал в каждой точке образца, зная приложенный ток на границе образца. Решение выше указанного уравнения возможно численным методом конечных элементов. Схематическое изображение допущений применимое для решения данной задачи представлено на рис 3(b).

В качестве примера реализация EIT метода плоского цементного образца представлена на рисунке 4

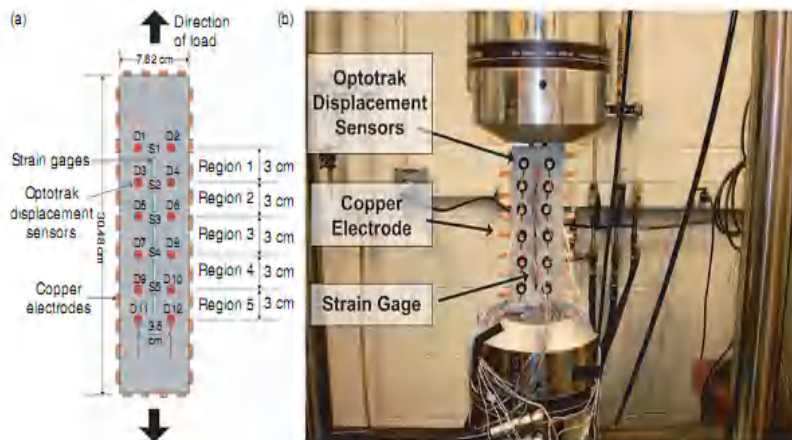


Рис. 4. Схема расположения датчиков на поверхности плоского образца применительно к методу EIT.

Очевидно, что данный метод требует более сложной подготовки образцов, но вместе с тем позволяет реализовать значительно большие возможности.

Вместе с тем преимущество данного метода заключается, например, в проведении исследований готовых конструкций в отсутствии внутренних встроенных электродов. В ряде случаев анализ напряженного и дефектного состояния осуществляется при приложении к исследуемому образцу циклических нагрузок. Таким образом, можно контролировать динамику образования дефектов на каждой стадии нагружения, как это представлено на рисунке 5.

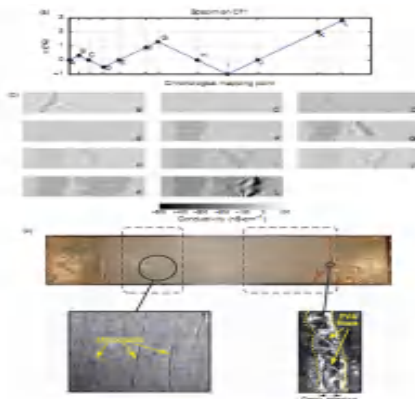


Рис. 5. Циклическое одноосное нагружение образца (а) график изменения нагрузки ; (b) карта изменения проводимости от точки В к точке L; (с) картина разрушения образца от начальной стадии до образования макротрещины.

Таким образом, метод ЕИТ несмотря на его кажущуюся сложность реализации можно рассматривать как новый неразрушающий метод контроля конструкций из бетона. Его преимущество осуществление постоянного пространственного контроля конструкций не требующих присутствие оператора. Кроме того применение данного метода позволяет выявить расположение трещин и дефектов, их геометрические параметры.

Анализ динамических нагрузок в бетонных конструкциях.

По сути выше изложенная методология разработки сенсоров была основана на анализе статических или незначительно изменяющихся во времени нагрузок. Вместе с тем, как правило, реальные конструкции в процессе эксплуатации подвергаются воздействию динамических нагрузок в области частот 0,1- 5 Гц, что приводит к образованию микротрещин на начальных этапах и их последующее объединение в магистральные трещины и в конечном итоге разрушению конструкции. Таким образом, очевидно, возникает потребность в разработке методики выявления такого рода дефектов на самых ранних стадиях их развития. Результаты экспериментов, выполненные в работе [16] показали, что приложение синусоидальных нагрузок в упругой области к цементному образцу вызывает отклик в виде также синусоидального изменения электросопротивления. Кроме того резкое изменение частоты прилагаемой нагрузки позволяет получить дополнительную более глубокую информацию о динамической чувствительности цементных образцов. На основе исследований были получены амплитудо-частотные зависимости в виде квазилинейных зависимостей между прикладываемой нагрузкой и электросопротивлением. На основании результатов полученных в исследовании в дальнейшем предполагается разработка прототипов сенсоров для анализа динамических нагрузок в строительных конструкциях на цементной основе.

Список использованных источников

1. Nanotechnology in Concrete / Sanchez F. and Sobolev K. // Construction and building materials, Vol. 24, № 11, 2010. P. 2060–2071.
2. Konsta-Gdoutos, Maria S., Zoi S. Metaxa, Surenda P. Shah. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement-based materials. *Cem. Concr. Res.* 2010, 40(7), 1052-9
3. Anastasia Sobolkina, Viktor Mechtcherine, Vyacheslav Khavrus, Diana Maier, Mandy Mende, Manfred Ritschel, Albrecht Leonhardt. Dispersion of carbon nanotubes and its influence on the mechanical properties of the cement matrix. *Cement & Concrete Composites* 34 (2012) 1104–1113
- 4 Петрунин С.Ю., Попов М.Ю., Ваганов В.Е., Решетняк В.В., Закревская Л.В. Опыт применения тубулярных углеродных наноструктур в строительных материалах. // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. М.: ЦНТ «НаноСтроительство». 2012. № 5. С. 65–80. URL: [http // www.nanobuild.ru](http://www.nanobuild.ru).
5. Раков Э.Г. Химия и применение углеродных нанотрубок // Успехи химии. – 2001. № 10. с. 934-937.
6. Меууарпан М (ed) 2005 Carbon Nanotubes – Science and application (Boca Raton, FL: CRC Press)
7. . Xun Yu, Eil Kwon. A carbon nanotube/cement composite with piezoresistive properties. *Smart Materials Structures* 18 (2009) 055010 (5pp)
8. Karhunen K.A. Seppanen A. Lehtikoinen, P.J.M. Monteiro, J.P. Kaipo «Electrical resistance tomography imaging of concrete» *Cement and concrete research.* 2010, 40 (1) 137-145
9. Sihai Wen, D.D.L. Chung. Damage monitoring of cement paste by electrical resistance measurements” *Cement and concrete research*, 2000, 30 (12) 1979-1982
10. Sihai Wen, D.D.L. Chung. Electrical-resistance based damage self-sensing in carbon fiber reinforced cement” *Carbon* (2007) 45 (4) 710-716
11. Joshua A. Hoheneder. Smart carbon nanotube/fiber and PVA fiber reinforced composites for stress sensing and chloride ion detection. Theses and dissertation 12-1-2012. University of Wisconsin-Milwaukee.
12. . Sihai Wen, D.D.L. Chung. “ Effects of stress on electric polarization in cement” *Cement and concrete Research* 2001, 31 (2) 291-295
13. Jingyao Cao, D.D.L. Chuang “Electric polarization and depolarization in cement-based materials, studied by apparent electrical resistance measurement” *Cement and Concrete research* 34(2004) 481-485
14. Sihai Wen, D.D.L. Chung. “Effects of strain and damage on strain-sensing ability of carbon fiber cement” *Journal of materials in civil engineering*” 2006, 18 (3) 355-360
15. Tsung-Chin Hou, Jerome P. Lynch. Electrical impedance tomographic methods for sensing strain fields and crack damage in cementitious structures. *Journal of intelligent material systems and structures.* V 20 (2009), 1363-1379
16. Annibale Luigi Materazzi, Fillippo Ubertini, Antonella D Alessandro. Carbon nanotube cement-based transducers for dynamic sensing of strain. *Cement Concrete Composites* 37 (2013) 2-11.