установленного на ПЭВМ. Более того, при необходимости возможно удаленное управление измерениями путем организации доступа к ПЭВМ по каналу Ethernet. В данной работе проведена разработка испытательно-измерительного комплекса для высокотемпературных преобразователей давления. Структура комплекса оптимизирована с учетом расширенного температурного диапазона. Комплекс включает климатическую камеру, камеру тепла, датчик давления, ПЭВМ и другие компоненты. Структура комплекса позволяет проводить автоматизированные и удаленные измерения.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.577.21.0245, уникальный идентификатор ПРИЭР RFMEFI57717X0245). В работе использовалось оборудование ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" (ЦКП НПК "Технологический центр").

1. Li S. et al, A novel SOI pressure sensor for high temperature application // 2015 J. Semicond. 36 014014.
2. Jiang X., High-Temperature Piezoelectric Sensing, Sensors 2014, 14, pp. 144-169.
3. Niu Z., Zhao Y., and Tian B., Design optimization of high pressure and high temperature piezoresistive pressure sensor for high sensitivity // Review Of Scientific Instruments 85, 015001 (2014).
4. Kurtz A. D., Ned A. A., and Epstein A. H., Ultra High Temperature Miniature SOI Sensors for Extreme Environments // IMAPS International HiTEC 2004 Conference Santa Fe, New Mexico, May 17-20, 2004.
5. Ned A. A., Kurtz A. D., Beheim G., Masheeb F., Stefanescu S., Improved SiC Leadless Pressure Sensors For High Temperature, Low and High Pressure Applications, Twenty-First Transducer Workshop Lexington, Maryland, June 22-23, 2004.
6. Guo S., Eriksen H., Childress K., Fink A., Hoffman M., High temperature smart-cut SOI pressure sensor // Sensors and Actuators A 154 (2009) pp.255–260.

Горленко Н.П.¹, Саркисов Ю.С.¹, Павлова А.Н.¹, Сырякин В.И.², Клестов С.А.²
Представления о волновом механизме процессов структурообразования
цементных композиций

¹*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

²*Национальный исследовательский Томский государственный университет*
(Россия, Томск)

doi:10.18411/spc-12-10-2018-03

idsp: 000001:spc-12-10-2018-03

Введение

В настоящее время цифровые технологии в исследовании физико-химических и эксплуатационных свойств строительных материалов позволяют оценить степень их неоднородности, выявить дефекты структуры, определить размеры пор и распределение их по объему образца. Известно, что внутреннее состояние системы «цемент-вода» зависит от множества факторов и в целом определяется формированием капиллярно-пористой трехфазной системы (твердая фаза - вода – вовлеченный воздух). Объемы непрореагировавшей части цемента, гелевых и капиллярных пор в значительных пределах изменяются во время твердения цемента. Управлять их развитием, а, следовательно, управлять и свойствами строительных материалов можно лишь на основе получения новых экспериментальных данных и детального анализа развития данных процессов. Это позволяет реализовать экспериментальные возможности цифровых технологий применительно к цементным композициям, причем в режиме реального времени, что неизбежно приведет к расширению представлений о механизме твердения вяжущих веществ.

Материалы и методы исследования

В работе использовался интеллектуальный рентгеновский 3D микротомограф (ИРМТ) со следующими основными характеристиками: различимость деталей (1-13) мкм; источник рентгеновского излучения- плавно-настраиваемый от 20 до 160 кВ; ток анода (0 – 250) мкА; размер фокального пятна < 5 мкм; охлаждение – воздушное; детектор рентгеновского излучения: 4872×3248 ячеек при размере одного элемента не более 7,4×7,4 мкм; время восстановления трехмерных изображений (1 см³) - 10 мин.

ИРМТ позволяет изучать участки образцов под любым удобным ракурсом и с высокоточным обеспечением (± 1 мкм) позиционирования исследуемого объекта без их разрушения и повреждения.

В качестве объекта исследования использовались образцы цементного камня размером $(2 \times 2 \times 2) \times 10^{-3}$ м, полученные на цементе марки ПЦ-500 при В/Ц = 0,34 в условиях влажного твердения.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены типичные изображения слоев цементного камня по мере увеличения глубины сканирования цементного камня.

Рисунок 2. Изображения поверхности цементного камня (а,б,в,г,д,е) с шагом по увеличению глубины сканирования - 4 мкм. (Увеличение $\times 5$).

Из анализа изображений поверхности цементного камня по глубине сканирования следует:

1. Распределение пор по площади и объему образцов носит случайный характер, а суммарная площадь пор на разных глубинах сканирования не является величиной постоянной.
2. Размеры пор формируются в диапазоне от 10-2 до 10-3 мкм в диаметре и на глубину от нескольких единиц до нескольких сотен микрометров.
3. Воздушные включения имеют как симметричные, так и не симметричные формы, что может быть связано с градиентами плотностей или их

отсутствием на границах раздела фаз «цементный камень-воздух», в момент потери вязкотекучего состояния цементной смеси (конец срока схватывания).

4. Визуально наблюдаются чередующиеся концентрические кольца на поверхности образцов, конфигурация которых меняется с изменением глубины сканирования. Однако расстояние между двумя минимумами впадин (темные кольца) или максимумами выступов (светлые кольца), остается практически постоянным, и ее среднее значение составляет 0,006 м.

Одной из причин, вызывающих формирование концентрических колец на поверхности образцов, на наш взгляд, может являться развитие процесса генерирования электромагнитных волн в объеме твердеющей системы. Известно, что протекание процессов гидратации и твердения цемента сопровождаются возникновением акустических колебаний частотой от 100 Гц до 20 кГц с интенсивностью 3–10 дВ, сопровождающих процессы диспергирования частиц цемента [1]. Можно предположить, что в системе «цемент-вода», особенно в момент затворения цемента водой возникают и более высокочастотные, в том числе, ультразвуковые колебания.

Этот вывод следует из следующих рассуждений. Допустим, что ультразвуковые колебания являются одной из возможных движущих сил диспергирования частиц цемента, а формирование колец является результатом образования стоячих волн в системе «цемент-вода» (рис. 3).

Рисунок 3. Схема образования стоячей волны. В - узлы стоячей волны, А-амплитуды колебаний, λ - длина волны.

Стоячие волны образуются, если две волны с одинаковыми амплитудой и длиной перемещаются в противоположные стороны. Это возможно, если электромагнитные колебания генерируются частицами или их образованиями, составляющими основную массу близких, в частности, по типоразмерам и свойствам. Другими словами, система представляет совокупность частиц с более или менее равномерно распределенными параметрами в образце, в котором, например, масса, упругость, размеры и другие показатели, являются близкими по значению в каждом элементарном объеме системы.

Известно, что под действием давления ультразвуковых волн наименьшие по размеру частицы и жидкая фаза будут отклоняться к узлу стоячей волны, а более крупные образования - в сторону наибольшего значения амплитуды колебаний [2]. В результате будут образовываться очаги уплотнения у поверхности соприкосновения источника электромагнитного излучения (темные кольца), за пределами которого будет располагаться участок с меньшей плотностью образований (светлые кольца) [3]. При этом, значение длины стоячей волны определяется как двойное расстояние между темными и светлыми кольцами на поверхности цементного камня и в среднем составляет 0,012 м (рис. 2).

Частота колебаний ультразвуковых волн в исследуемой среде определяется уравнением:

$$f = c/\lambda$$

где c - скорость распространения ультразвука в твердеющей системе, λ - длина волны, f - частота колебаний.

Учитывая, что в начальный момент твердения система представляет собой жидкую среду и скорость распространения ультразвука здесь условно можно принять равной скорости распространения волны в воде (1490 м/с). По мере формирования цементного камня она увеличивается и варьируется в интервале (1930-3000 м/с) [4].

Рассчитаем частоту колебаний стоячих волн согласно вышеприведенной формуле:

$$f = (1490-3000)/0,012 = (124,2 - 250,0) \text{ кГц.}$$

На самом деле, как следует из рис. 1, стоячие волны характеризуются целым спектром частот, включающих кратные между собой гармоники, вследствие чего следует ожидать более широкий интервал частот. А именно, от звукового до мегагерцевого диапазона, наблюдаемых экспериментально [4].

На наш взгляд, источником генерации электромагнитных волн является частота собственных колебаний частиц в цементной системе, которую можно оценить по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$$

где f - частота собственных колебаний тела, $k = F/l$ - коэффициент пропорциональности, представляющий собой упругую силу, приходящуюся на единицу длины связи, $l = 2r$; m - масса частицы.

В начальный момент твердения цементный раствор представляет собой коллоидную систему с размерами частиц ($10^{-6} - 10^{-8}$) м. Принимая плотность цементного теста равной 1400 кг/м^3 , определим массы отдельных частиц:

$$m = V\rho = (10^{-6}-10^{-8})^3 \times 1400 \approx (10^{-15} - 10^{-21}) \text{ кг.}$$

Для частиц, проявляющих диполь-дипольное взаимодействие, $k = (0,9-1,8) \times 10^{-7} \text{ кг/м}$ [5].

Тогда:

$$f = 0,16 \sqrt{\frac{(0,9-1,8) \times 10^{-7}}{(10^{-15} - 10^{-21})}} = (2 \times 10^3 - 1,5 \times 10^6) \text{ Гц}$$

Таким образом, если в системе находятся совокупность близких по размерам и массе частиц, то при генерации собственных электромагнитных колебаний возможно формирование стоячих волн с частотами акустического и ультразвукового диапазонов. Так как преобразование энергии из кинетической формы в потенциальную и обратно происходит в пределах участка системы (рис.3), а именно, от амплитуды до соседнего узла, то отсутствуют энергетические потери, так как каждый такой участок не обменивается энергией с соседними участками, что характерно для стоячих волн. Отсутствие энергетических потерь может являться одной из причин интенсификации процессов диспергирования, гидратации частиц цемента и структурообразования цементного камня. Отсюда следует, что создание условий поддержания в системе состояния стоячих волн, может служить дополнительным источником улучшения эксплуатационных характеристик цементных композиций.

Косвенным доказательством эффективного влияния ультразвука на процессы интенсификации процессов гидратации, диспергирования, структурообразования являются многочисленные литературные данные [6,7]. Можно предположить, что генерирование внутренних электромагнитных волн в объеме системы «цемент-вода» в

начальные сроки твердения является, наряду, например, с тепловым воздействием дополнительным активирующим фактором на развитие процессов твердения.

Следует отметить, что формирование сферических «колец» может наблюдаться и при условии состояния сферической бегущей волны. Это обусловлено различными скоростями распространения поперечных C_1 и продольных C_2 волн. Их отношение зависит от коэффициента Пуассона, характеризующего величину отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2 - 2\nu}}$$

где V_1 , V_2 – скорости распространения продольных и поперечных волн соответственно, ν – коэффициент Пуассона.

Принимая во внимание, что для бетона $\nu=0,2$ [8]:

$$\frac{V_1}{V_2} = \sqrt{\frac{1-2 \times 0,2}{2-2 \times 0,2}} = 0,375.$$

С учетом приведенных расчетов твердеющую систему можно рассматривать как среду с электромагнитным импедансом, где $V_1 < V_2$, что и приводит к образованию визуально наблюдаемым сферическим кольцам.

Закключение.

Показано, что при твердении системы «цемент-вода» одной из возможных движущих сил процессов гидратации и диспергирования частиц цемента может являться генерация внутренних электромагнитных колебаний с частотами акустического и ультразвукового диапазонов, что позволит в будущем создать волновую теорию твердения цементных композиций.

1. Лотов В.А. О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 99–110.
2. Гонткевич В.С. Собственные колебания пластинок и оболочек. Справочное пособие. – Киев: Наукова думка, 1964. – 288 с.
3. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1961. – 404 с.
4. Колесников В. Г. Электроника: энциклопедия, 1991. – 688 с.
5. Горленко Н.П., Саркисов Ю.С. Низкоэнергетическая активация дисперсных систем. Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. – 264 с.
6. Осипов Ю.Р., Воропай Л.М., Сеничев В.П., Шлыков С.А. Эффективность применения ультразвука в производстве древесно-цементных композиций. Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2015. – Т.1. – С. 1–10.
7. Соломатов В.И., Тахиров М.К. Интенсивная технология бетонов. – М.: Стройиздат, 1989. – С. 69 – 75.
8. Сивухин Д. В. Общий курс физики. – М.: Физматлит, 2005. – Т. 1. – Механика. – С. 414 – 560 с.

Ефремкин С.И., Грицун Б.М., Савчиц А.В.

Разработка автоматизированной системы управления биореактором для выращивания микроводорослей

Волжский политехнический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (Россия, Томск)

doi:10.18411/spc-12-10-2018-04

idsp: 000001:spc-12-10-2018-04

Аннотация

В статье обосновывается перспективность создания автоматизированной системы управления биореактором для выращивания микроводорослей. Это