
ИЗ ОПЫТА РАБОТЫ

Г.Г. Горовенко,

В.Г. Жекул, Д.Н. Ляпис, П.П. Малюшевский, А.Г. Муха, И.С. Швец

ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ БЕТОНОВ БУРОНАБИВНЫХ СКВАЖИН

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Расходы материалов, трудозатрат, машин, механизмов и других ресурсов в промышленном и жилищном строительстве зависят в основном от того, насколько эффективно используются прочностные и деформационные свойства грунта. Если удастся создать единую систему свая–грунт, при формировании которой повышается несущая способность сваи по материалу, и одновременно улучшаются строительные свойства исходного грунтового массива, то получается надежный фундамент при минимальном расходе ресурсов.

По мнению ряда разработчиков, здесь весьма велики возможности разрядно-импульсных технологий (РИТ) [1–3].

Сущность РИТ обустройства свай заключается в том, что в скважине, заполненной жидкой бетонной смесью, производят электрические взрывы с определенной частотой посылок. Каждый электрический взрыв (ЭВ) в бетонной смеси порождает волны давления и послевзрывную расширяющуюся полость, воздействующие на стенки скважины. Грунт в зоне такого воздействия уплотняется, а скважина расширяется, причем каждое локальное расширение сразу же заполняется бетонной смесью.

Сваи, созданные по РИТ, обладают особенностями в силу специфики их обустройства. При изготовлении сваи по РИТ происходит уплотнение грунта, прилегающего к скважине, в которой она формируется, поэтому такая свая обладает преимуществами по сравнению с буронабивной или буронабъекционной, изготовленными по традиционным технологиям.

Однако материал сваи, изготавливаемой по РИТ, неизбежно должен изменять свои свойства, поскольку ЭВ оказывает на него сильное физическое и физико-химическое воздействие, а кроме того, в закачиваемый и подвергаемый ЭВ воздействию бетонный раствор неизбежно попадает глинистая составляющая с уплотняемых стенок скважины. До настоящего времени в литературе нет данных о том, каким образом и как интенсивно протекают такие изменения.

Целью настоящей работы – выявление основных закономерностей изменения свойств бетонов или их компонентов при электровзрывном воздействии, в том числе при наличии глинистой составляющей.

Основные методические положения. Исследования воздействия ЭВ обработки на свойства цементного теста и камня производились на лабораторных установках, состоящих из генераторов импульсных токов и технологических узлов. Генераторы импульсных токов отличались в основном по мощности и состояли из следующих устройств: входного регулировочного, зарядного, зарядной цепи, батареи импульсных конденсаторов, разрядного контура, защиты, измерительных цепей и цепей управления.

В качестве технологических узлов использовались электроразрядные реакторы различной геометрии, порционной или непрерывной обработки.

© Горовенко Г.Г., Жекул В.Г., Ляпис Д.Н., Малюшевский П.П., Муха А.Г., Швец И.С., Электронная обработка материалов, 2004, № 4, С. 91 – 95.

В экспериментах применялись цементы Ольшанского завода (М 400) и гидрофобный Белгородского завода (М 400), а также цементы специального помола на клинкере Белгородского завода с удельной поверхностью 5000, 4000 и 1700 см²/г. Для исследования влияния ЭВ на глинистую составляющую в качестве объектов обработки выбраны типичные мономинеральные представители кристаллохимических групп глинистых алюмосиликатов слоистой и слоисто-ленточной структур, широко распространенные в природе и используемые в различных технологических операциях – монтмориллонит и палыгоскит Черкасского месторождения, а также каолинит Глуховецкого месторождения. Каолинит резко отличается от монтмориллонита и палыгорскита своей слабой структурообразующей способностью, как большинство местных малоколлоидных глинистых минералов.

Методы испытаний структурно-механических свойств цементного теста и камня – стандартные. Физико-химические превращения в активированном цементном камне изучались методами термо- и петрографического анализов.

Реологические характеристики исследовались на ротационном вискозиметре ВСН-3, коническом пластометре МГУ и консистометре КЦ-3.

В данной работе использован аналогично [4] электроосмотический метод измерения дзета-потенциала, позволяющий рассчитать его величину в статических условиях. Стационарность электроосмотического процесса обеспечивалась постоянством напряжения внешнего электрического поля постоянного тока.

Реакционная способность вяжущих компонентов в цементном камне по отношению к жидкой фазе количественно определялась методом потенциодинамических кривых. Последние измерялись в трехэлектродной электрохимической ячейке, в которой рабочий электрод выполнялся из исследуемого цементного камня; вспомогательный электрод, необходимый для поддержания заданного значения потенциала, – из платинового, а измерения выполнялись относительно электрода сравнения (хлорсеребряного). Использовался потенциостат П-5827М при заполнении трехэлектродной ячейки дистиллированной водой и 5% раствором Na₂SO₄ [4].

Все обработки цементного теста выполнялись с использованием оптимальной длины разрядного промежутка в разрядном контуре, которая оценивалась по стандартной методике путем изучения осциллограмм разрядного тока.

Для оценки степени диспергирования твердой фазы активированного цементного теста его обезвоживали стандартным способом и дисперсность цемента изучали с помощью ситового анализа и микроскопа МИН-8, а также методами воздухопроницаемости и низкотемпературной адсорбции азота.

Хранение и испытание бетонных образцов на прочность производились согласно ГОСТ 10180-78.

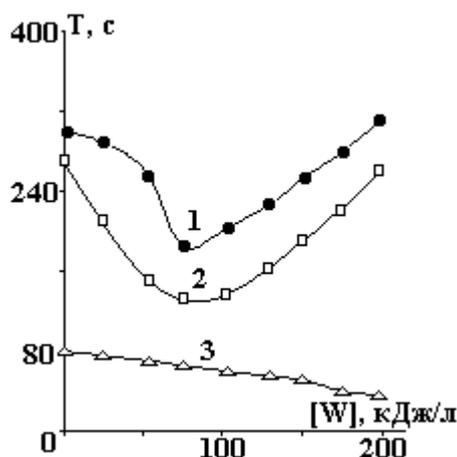
Исследование адгезии заполнителей с водоцементными суспензиями различной эффективной вязкости в период до начала твердения системы осуществлялось на приборе рычажного типа по методу И.А. Киреенко. Прочность адгезионного сцепления минерального заполнителя с цементным камнем в период 7 – 30 суток определялась методом конгломератного склеивания на стандартных образцах-восьмерках. Испытания восьмерок проводились на разрывной машине РЦ-1. Площадь сечения определялась методом фотографии по контуру и взвешиванием получаемых фигур.

Микротвердость контактной зоны измерялась согласно методике НИИЖБ на полированных шлифах, изготавливаемых из цементного камня нормальной плотности и единичных зерен заполнителя твердомером ПМТ-3.

Главным варьируемым фактором ЭВ воздействия выбрана величина удельной энергии воздействия [W], определяемая по формуле $[W] = W_0 \cdot n / V$ (здесь W_0 – запасаемая энергия на 1 импульс кДж; n – количество импульсов; V – объем обрабатываемого раствора, м³).

Результаты исследований. Цементные частицы, выделенные из активированного ЭВ цементного теста, более однородны по размерам; значительно увеличилось число частиц с размерами меньше 50 мкм, частицы здесь с неровными, угловатыми очертаниями, в то время как в неактивированном цементном тесте цементные частицы имеют форму, близкую к сферической. В активированном ЭВ цементном тесте удельная поверхность твердой фазы составляла в среднем 7000–7500 см²/г, тогда как в контрольном образце (неактивированном) – 3000–3300 см²/г. Определенная методом низкотемпературной адсорбции азота удельная поверхность составляла в контрольной пробе 29000 см²/г и в активированной пробе – 50000 см²/г. При активации ЭВ цементного теста происходит изменение технических свойств твердеющего цементного теста, как показано на рисунке. Характерно, что время твердения и время конца твердения имеют минимум в диапазоне $[W] = 55–70$ кДж/л, в то время как

время начала схватывания по мере увеличения $[W]$ монотонно убывает. В диапазоне варьирования удельной энергией $[W]$ от 1 до 100 кДж/л заметно увеличивается скорость твердения и уменьшается время конца твердения.



Усредненные зависимости технических свойств твердеющего цементного теста от удельной энергии разрядов, вводимых в обрабатываемый объем. 1 – время конца твердения; 2 – время твердения; 3 – время начала схватывания

Вероятно, активация цементного теста способствует в первую очередь активации самой воды затворения, а вода в таком состоянии – увеличению скорости коагуляции коллоидных растворов, что и ускоряет схватывание – превращение пластичной массы в непластичную. В свою очередь, скорость коагуляции определяет концентрация трехвалентных ионов, которые появляются при растворении продуктов гидратации гидроалюмината кальция. То есть если существует состояние воды, способное влиять на процессы гидратации при затворении цементного раствора, существует и время жизни такого состояния.

На основании результатов испытаний образцов из активированного бетона можно заключить, что прочность цементного камня увеличивается почти на 20%.

Увеличение удельной энергии активации цементного теста до $[W] = 300 - 400$ кДж/л приводит к относительно медленному увеличению прочности цементного камня почти в два раза – до 40%. Но при $[W] > 400$ кДж/л в твердеющем цементном тесте гелевая составляющая резко возрастает, что приводит к развитию коагуляционно-кристаллической структуры с многочисленными дефектами за счет механохимической деструкции, и прирост прочности цементного камня становится ничтожным, а затем прочность его резко уменьшается.

Макроскопические флуктуации плотности в цементном тесте существенно определяют микроструктуру цементного камня, повышают его флюидопроницаемость, снижают морозостойкость и усталостную прочность. Процесс образования дефектов структуры активно происходит на фоне и в период водоотделения из цементного теста. Активация ЭВ цементного теста приводит к увеличению его водоудерживающей способности и снижению величины макроскопических флуктуаций плотности в нем.

Установлено, что в процессе ЭВ активации цементного теста происходит и активация физико-химических процессов на поверхности заполнителя при его взаимодействии с цементным вяжущим. При этом увеличивается водопоглощение, а также интенсивность водопоглощения. Кроме того, происходит и деформация кристаллических решеток минералов-заполнителей. Все это способствует увеличению прочности адгезионного сцепления с водоцементными суспензиями как в начальном периоде, так и в завершающем.

Адгезия в неактивированном образце к семи суткам твердения уменьшается, а в активированном образце, наоборот, возрастает по сравнению с величиной адгезии неактивированного камня двух суточного твердения примерно в 3 раза, а по отношению к семи суточным образцам неактивированного бетона – в 5,2 раза.

Активация бетона ЭВ позволяет регулировать реологические характеристики цементного теста.

При $[W] = 80$ кДж/л время нарастания пластичной прочности коагуляционно-кристаллической структуры цементного теста с соотношением вода/цемент = 0,33 в среднем на 90 мин

больше, хотя в дальнейшем структурообразование в активированных образцах идет значительно быстрее. При $[W] = 40$ кДж/л структурная вязкость и динамическое сопротивление сдвига цементного теста с отношением В/Ц = 0,6 снижаются по сравнению с неактивированными образцами более чем на 100%.

Улучшение реологических характеристик при $[W] = 40-100$ кДж/л для цементного теста различного состава связано, вероятно, с разрушением агрегатов цементных зерен, образовавшихся в цементе в период хранения и затворения, более равномерным распределением воды между частицами цемента в тесте и уменьшении вязкости воды при электрических разрядах.

Исследование удобоукладываемости активированной ЭВ бетонной смеси показали, что при одинаковом увеличении расхода воды затворения характер изменения ее подвижности изменяется. Подвижность не растет линейно, как у контрольных образцов, но имеет максимум, и дальнейшее добавление воды не приводит к существенному росту подвижности. Вероятно, это связано с иным водопоглощением активированной ЭВ смеси, но этот фактор существенно повышает удобоукладываемость бетона в условиях свайной скважины, а совместно с другими вышеприведенными факторами позволяет получить бетон с повышенными прочностными характеристиками без дополнительного расхода вяжущего.

Следует отметить, что ЭВ активация цементного теста на основе различных цементов многократно снижает газопроницаемость двухсуточного цементного камня (воздух) и максимальное снижение газопроницаемости достигается при $[W] = 275$ кДж/л.

Данные рентгенофазового анализа показали на увеличение в образцах активированного ЭВ цементного камня (365 суток твердения) дифракционных отражений, характерных для гидроокиси кальция. В то же время интенсивность отражений CaCO_3 ниже. Термограммы проб активированного цементного камня 365-суточного твердения позволили установить повышенное количество гидросиликатов – эндозффекта в интервале температур 100–200°C. Результаты рентгено-фазового и термографического анализов свидетельствуют о том, что в результате ЭВ активации происходит значительное изменение кинетики фазообразования.

Установлено, что при увеличении режимов ЭВ активации ($[W]$) и увеличении удельной поверхности исходного цемента дзета-потенциал цементного теста возрастает.

Образцы цементного камня двухсуточного твердения исследовались в иммерсии на поляризационном микроскопе МИН-8. В неактивированных образцах содержалось около 49% негидратированных частиц, а пористость составляла около 8%. При $[W] = 80$ кДж/л пористость составила 6%, а количество негидратированных частиц – 35%. При $[W] = 200$ кДж/л негидратированных частиц оказалось 30%, а пористость – 3% всей площади шлифа.

Водоотдача в цементном тесте до $[W] = 40$ кДж/л несколько возрастает, при $[W] > 40$ кДж/л коэффициент водоотделения начинает уменьшаться и при достижении $[W] = 150$ кДж/л при активации ЭВ более, чем в 5 раз.

Во время ЭВ активации бетонного раствора в скважине в него неизбежно попадает заметное количество глинистых минералов. Концентрация глинистых суспензий может быть от 5 до 20%.

Изучение изменений физико-химических характеристик исследуемых глинистых суспензий с ростом энергии ЭВ воздействия, приведенных в таблице, позволяет утверждать о сильном диспергирующем действии ЭВ на глинистые минералы. Разрушаются связи между глинистыми частицами и дисперсной средой, перераспределяются гидратные оболочки, крупные агрегаты распадаются на мелкие. Главным воздействующим фактором ЭВ здесь явно является электроразрядная нелинейная, объемная кавитация [5]. Захлопывание кавитационных пузырьков на поверхности частиц, а также в зонах, близких к ним, генерирует очень короткие, высокоамплитудные импульсы давления, производящие эффективное разрушение и активацию.

Повышение дисперсности системы глиноминераловода, возрастание свободной поверхностной энергии, активация поверхности частиц вызывают необходимость новых контактов и создания пространственных коагуляционно-тиксотропных структур. Для каолинита и ММКГМ с ростом энергии воздействия наблюдается увеличение гидрофильности и величины набухания, которые при дальнейшем увеличении $[W]$ достигают насыщения. Видимо, возрастающее число активных частиц минерала создает возможность более частых столкновений, в результате которых образуются как коагуляционные структуры, так и новые агрегаты частиц. То есть параллельно с процессом диспергирования протекает и автокоагуляция, а значит, для обычных местных малоколлоидных глиноминералов эти процессы находятся в некотором динамическом равновесии.

Кроме того, глиноминералы в условиях ЭВ активации увеличивают свою гидрофильность, а значит, связывают излишки воды в цементном тесте, снижая его растекаемость. Изменяя удельную энергию ЭВ воздействия на цементоглинистые растворы, можно получать улучшенные технические характеристики бетона буронабивных свай.

Изменение гидрофильных свойств и набухающей способности каолинита и ММКГМ при ЭВ активации растворов

| [W]10 ⁻⁴ , кДж/м ³ | Каолинит | | | ММКГМ | | |
|--|-----------|---|--|-----------|---|--|
| | Q, кДж/кг | S ₁ ·10 ⁻³ , м ² /кг | H·10 ³ , м ³ /кг | Q, кДж/кг | S ₁ ·10 ⁻³ , м ² /кг | H·10 ³ , м ³ /кг |
| 0 | 5,15 | 44,4 | 0,38 | 5,6 | 198,0 | 0,42 |
| 10 | 5,31 | 48,8 | 0,42 | 6,1 | 202,0 | 0,44 |
| 15 | 5,65 | 48,7 | 0,43 | 6,5 | 206,2 | 0,46 |
| 25 | 5,94 | 51,2 | 0,43 | 7,4 | 209,8 | 0,47 |
| 35 | 6,65 | 57,4 | 0,44 | 8,0 | 215,0 | 0,46 |
| 40 | 6,77 | 58,5 | 0,48 | 8,4 | 222,0 | 0,48 |

Примечание. ММКГМ – местные малоколлоидные глинистые материалы; Q – энергия связи воды с поверхностью частиц глинистых материалов (теплота смачивания); H – величина набухания; S₁ – эффективная удельная поверхность

В итоге должна повышаться и прочность на изгиб затвердевшего цементного камня-бетона сваи, изготавливаемой по РИТ.

Таким образом, при использовании РИТ для уплотнения грунта, окружающего сваю, и самого тела буронабивной сваи, свойства и технические характеристики системы грунт–свая улучшаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рытов С.А. Электроразрядная технология устройства свай и анкеров / С.А. Рытов, П.В. Смирнов // Импульсные процессы в механике сплошных сред: Материалы V Международной научной школы-семинара (август, 2003). Николаев, 2003. С. 80–82.
2. Джантмиров Х.А., Крючков С.А., Смирнов П.В. Применение технологии электрического взрыва в геотехническом строительстве // Там же. С. 83–85.
3. Джантмиров Х.А., Кристалев Е.Г., Нистратов В.М., Смирнов П.В. Выбор параметров и разработка электроразрядных установок с электрохимическим взрывом // Там же. С. 85–87.
4. Бережной А.И., Муха А.Г. Экспериментальные исследования электрогидравлического кондиционирования тампонажных смесей // Научные основы получения и применения промывочных жидкостей и тампонажных растворов. Часть 1. Киев, 1974. С. 182–186.
5. Малюшевский П.П. О механизме тонкого измельчения материалов при электрическом взрыве в ограниченном объеме // Электронная обработка материалов. 1982. № 3. С. 58–63.

Поступила 22.12.03

Summary

The results of experimental researches of the influence of electrical explosions on basic performances of driven cast-in-place piles concrete are presented. It is shown that under the influence of shockwaves and cavitation of electrical explosions the technical properties of concrete are improved, despite of hit of clay minerals in concrete paste.