

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ И
МЕТОДА ЗАТВОРЕНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ГИДРАТАЦИИ И
ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТА**

**Տ.Մ. ԱՅՐԱՔԵՏՅԱՆ, Լ.Գ. ԲԱԳԻՆՈՎԱ, Կ.Գ. ԳՐԻԳՐՅԱՆ, Ա.Ա. ԽԱՇԱՏՐՅԱՆ,
Կ.Ն. ԷԴԻԼՅԱՆ, Տ.Մ. ԵՅԼՈՅԱՆ**

Институт общей и неорганической химии им. М.Г. Манвеляна
Национальной академии наук Республики Армения,
0051, г. Ереван, ул. Аргутяна, 2 пер., 10
E-mail: surenh2003@yahoo.com

Поступило: 10.03.2023

Целью исследования было изучено влияние метода затворения цементной пасты, в частности, использования в данном процессе ультразвука, разного типа поверхностно-активных веществ (ПАВ), а также сочетания обоих подходов на процессы гидратации цемента и прочность образующегося материала. В качестве анионного ПАВ был использован лаурилсульфат натрия (ЛСН), а неионогенного ОП-10. Данные рентгенографического анализа, оптической микроскопии, а также результаты испытаний образцов цемента на прочность на ранних стадиях гидратации указывают на то, что ультразвуковое затворение цементной пасты, а также добавки обоих типов ПАВ (как при ручном, так и ультразвуковом перемешивании) ускоряют процессы гидратации цемента. Установлено, что наиболее прочными после 28 суток гидратации являются образцы полученные ультразвуковым перемешиванием цементной пасты без добавок эмульгаторов или ручным перемешиванием, но с добавкой неионогенного ПАВ ОП-10.

Библ. ссылок 22, рис. 2.

Ключевые слова: цемент, ПАВ, ультразвук, гидратация, гидросиликат кальция, структура, прочность

Как известно, качество вяжущих веществ оценивается по прочности изделий, получаемых путем их затворения и последующего твердения. Обычно схватывание и твердение цемента связано с гидра-

тацией цементного теста. Гидратация цемента представляет собой сложный процесс, на который влияют как внутренние химические и физические процессы, так и внешние условия отверждения [1-4].

Метод смешивания - один из факторов, который имеет большое влияние на прочность вяжущего материала, в частности, цемента. Эффективный метод смешивания улучшает диспергирование частиц цемента в смеси, тем самым влияя на конечные свойства материала.

Ультразвуковое перемешивание цементной пасты имеет большие преимущества по сравнению с традиционными технологиями механического смешивания [3-6].

Традиционные технологии смешивания вяжущих материалов не обеспечивают достаточного диспергирования агломератов частиц цемента [5] и других цементирующих материалов. В то время как наружные частицы таких агломератов подвергаются воздействию воды, внутренние поверхности частиц остаются сухими. Это приводит к медленной и неполной гидратации цемента.

Ультразвуковое перемешивание использует кавитационные силы сдвига, которые более эффективны при смешивании мелкодисперсных материалов, чем обычные смесители. Для цемента эта характеристика значительно повышается за счет ультразвукового диспергирования, поскольку оно улучшает распределение частиц и контакт с водой.

Для улучшения эксплуатационных характеристик цемента при его затворении используются также различного рода добавки, в частности, поверхностно-активные вещества (ПАВ) [7-11].

Поверхностно-активные добавки, вводимые в смесь в весьма малых дозах (в концентрациях не превышающих критическую концентрацию мицеллообразования) благодаря своей высокой поверхностной активности, адсорбируются в виде тончайшего слоя на зернах вяжущего и других мелкозернистых компонентов и видоизменяют характер поверхностных явлений при смачивании зерен водой и таким образом влияют на процессы гидратации цемента.

При использовании ионогенных ПАВ они могут адсорбироваться на частицах цемента придавая им заряд, то есть приводят к возникновению электростатических сил, вызывающих дезинтеграцию частиц вяжущего вещества [12]. С другой стороны образующийся при этом на частицах цемента тонкий слой ПАВ, может защищать их от гидратации и, соответственно, увеличивать время схватывания вяжущего.

Известно, что образующиеся в свежей цементной пасте пузырьки воздуха нестабильны и имеют ограниченный срок жизни [9].

С увеличением концентрации ПАВ выше критической концентрации мицеллообразования (ККМ) образуются мицеллы, что приводит к

пенообразованию и стабилизации пузырьков воздуха в цементной пасте [7].

Взаимодействие между частицами цемента и мицеллами поверхностно-активного вещества приводит к непосредственному взаимодействию между частицами цемента и пузырьками воздуха, то есть ПАВ в данном случае играет роль воздухововлекающего агента. Прикрепление твердых частиц цемента к пузырькам воздуха также приводит к их стабилизации [12, 13].

Это явление используется для получения бетонов с повышенной морозостойкостью и легких пенобетонов, использование которых растет особенно при строительстве высотных зданий, морских конструкций, длиннопролетных мостов и т.д. [9, 14].

Однако на данном этапе исследований нас интересовало влияние ПАВ на процессы гидратации цемента и, соответственно, на его прочностные свойства. Поэтому концентрации используемых нами ПАВ не превышали их ККМ.

Анализ научно-технической литературы показывает, что имеется достаточно много работ по влиянию добавок ПАВ, а также ультразвукового перемешивания на структурные и прочностные свойства затвердевшего цемента, однако крайне мало работ в которых совмещались бы оба эти подхода и они в основном посвящены получению композитов на основе цемента и нанонаполнителей [15,16].

Целью данной работы является изучение влияния способа замешивания цементной пасты, как в присутствии, так и в отсутствие различных по природе поверхностно-активных добавок, на процесс гидратации цемента и механическую прочность конечного продукта.

Результаты и их обсуждение

Данные по влиянию методов перемешивания цементной пасты, а также наличия или отсутствия добавок ПАВ на прочность образцов цемента, выдержанных во влажной атмосфере в течение 28 дней, приведены в табл.1. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наибольшей прочностью на сжатие обладают образцы подвергшиеся ультразвуковой обработке мощностью 95 W, а также образцы полученные ручным перемешиванием но с добавкой неионогенного ПАВ ОП-10.

Общеизвестно, что наиболее важным и основным по количественному содержанию (до 70 масс.%) минеральным компонентом цемента является трехкальциевый силикат алит (C_3S) [17], который обладает большой активностью в реакции с водой. Основными продуктами гидратации алита являются гидраты силикатов кальция ($C-S-H$) которые в

первую очередь обеспечивают прочность и объемную стабильность цементирующего материала [4]. Алит достаточно быстро твердеет и набирает высокую прочность.

Таблица 1

Прочность на сжатие образцов цемента после 28 суток гидратации

N	Метод перемешивания	ПАВ	Прочность на сжатие, МПа
1	Ручное	-	47.0
2	“_“	ОП-10	53.0
3	“_“	ЛСН	37.0
4	УЗ (50%)	-	52.0
5	УЗ (50%)	ОП-10	46.1
6	УЗ (50%)	ЛСН	28.0

Вторым по количественному содержанию в цементе является двух-кальцевый силикат белит (C_2S) [17], который значительно менее активен, чем алит и твердение которого происходит медленно.

Поэтому для того чтобы понять как влияют методы перемешивания цементной пасты и целевые добавки на образование гидратов силикатов кальция и, соответственно, на прочность отвержденного цемента был проведен рентгенографический анализ полученных материалов.

Однако анализ рентгенограмм отвержденного цемента сопряжен с рядом проблем, так как дифракционные пики алита, являющегося преобладающей фазой цемента перекрывают пики белита и гидратов силикатов кальция.

Однако по ряду дифракционных пиков все-таки можно оценить влияние различных факторов на гидратацию цемента.

Так, исследования показывают, что уже после 4 часов гидратации можно заметить некоторую разницу в рентгенограммах затворенного цемента в зависимости от метода его замешивания и целевых добавок (рис. 1). Так у всех гидратированных образцов наблюдается новый пик при 29.3° , который характерен для гидрата силиката кальция подобного тобермориту [18], однако этот пик более ярко выражен и интенсивен в случае применения ультразвукового перемешивания или добавок ПАВ. При этом данный дифракционный пик во всех гидратированных образцах, за исключением случая применения ультразвука с добавкой ЛСН, более интенсивен чем пик при 29.5° , который характерен алиту

[19]. Также при применении ультразвукового перемешивания или добавок ПАВ появляется диффракционный пик при 30.1° , характерный тобермориту [17, 18, 20]. Кроме того, в случае добавки неионогенного ПАВ ОП-10 при ручном перемешивании цементной пасты, на рентгенограмме наблюдается также диффракционный пик при 29.7° , соответствующий гидрату силиката кальция общей формулы $\text{Ca}_{1.5}\text{SiO}_{3.5}\text{xH}_2\text{O}$ [20].

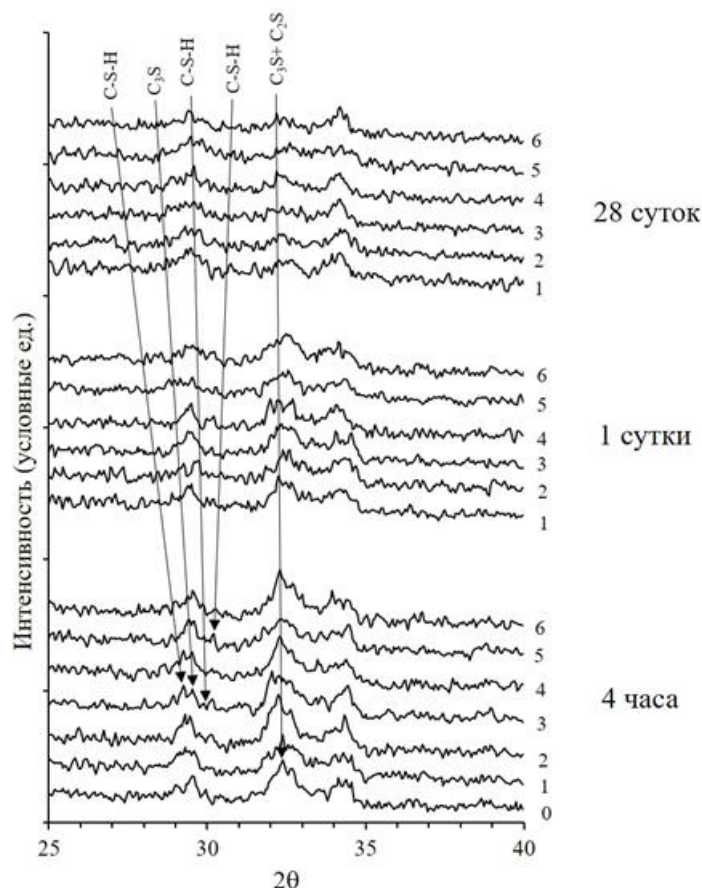


Рис. 1. Рентгенограммы цемента на разных стадиях гидратации (4 часовой, 1 и 28 суточной)

0 – исходный цемент; 1 - ручное перемешивание; 2 - ручное перемешивание + ОП-10; 3 - ручное перемешивание + ЛСН; 4 – ультразвуковое перемешивание; 5 - ультразвуковое перемешивание + ОП-10; 6 - ультразвуковое перемешивание + ЛСН.

Сравнение рентгенограмм образцов после увеличения времени гидратации цемента до 1 суток показывает, что диффракционный пик при 29.3° сохраняется для образцов затворенных ручным перемешиванием с добавкой неионогенного ПАВ ОП-10 или ультразвуковым перемешиванием, но с добавкой анионогенного ПАВ - лаурил сульфата

натрия. Для всех остальных случаев данный пик смещается в область 29.35° - 29.5° . Эволюция морфологии C-S-H может быть связана с изменением содержания структурной воды в кристаллах гидратов по мере увеличения времени гидратации. Это приводит к тому, что пик образующегося гидрата силиката кальция налагается на пик алита, также имеющего диффракционный пик при 29.5° и данный пик, интенсивность которого казалось должна уменьшаться по мере увеличения степени гидратации цемента, вновь возрастает. При этом у образца с добавкой неионогенного ПАВ существенно возрастает интенсивность диффракционного пика C-S-H при 29.7° . Кроме, того в случае ультразвукового перемешивания цементной пасты, характерный для тоберморита диффракционный пик при 30.1° смещается к 30.2° , что также может быть связано с изменением содержания кристаллизационной воды в C-S-H.

Следует отметить, что после суток гидратации цемента даже у образца, затворенного ручным перемешиванием без добавок ПАВ, появляется диффракционный пик при $2\theta = 30.1^{\circ}$. Наряду с этим, у образцов затворенных путем ультразвукового перемешивания или ручным перемешиванием, но с добавками ПАВ, на рентгенограммах появляются пики в интервале 31.9° - 32° , характерные для C-S-H, имеющих структуру подобную тобермориту [17].

Дальнейшее увеличение времени гидратации до 28 дней приводит к тому, что на диффрактограммах всех гидратированных образцов существенно уменьшается интенсивность пика при 32.4° , характерного для C_3S+C_2S [20] и ярко выраженного на рентгенограмме исходного цементного порошка. Очевидно, что это является результатом более глубокой степени гидратации цемента. Столь длительное гидратирование приводит также к тому, что пик при 30.1° смещается к 30.2° уже для всех образцов, в независимости от метода затворения и наличия или типа целевых добавок.

Таким образом становится очевидным, что метод затворения и добавки ПАВ влияют как на скорость гидратации цемента, так и структуры образующихся гидратов силикатов кальция, что особенно заметно на начальных стадиях процесса.

Метод оптической микроскопии широко применяется для определения характеристик материалов на основе цемента [21]. Данным методом нами исследовано влияние методов перемешивания цементной пасты и целевых добавок на характеристики кристаллов гидросиликатов кальция, образующихся при гидратации. В частности, было проведено статистическое определение размеров кристаллов эттрингита, представляющего собой гидросульфоалюминат кальция, который является составной частью структуры гидратированного цемента и

определяет формирование его ранней прочности [22]. Данный выбор обусловлен также тем, что кристаллы этtringита, имеющие удлиненную и игольчатую форму, сравнительно легко идентифицируются методом оптической микроскопии.

Результаты показали, что после 4 часов гидратации цементов, наблюдаемые оптическим микроскопом размеры кристаллов этtringита, колеблются в пределах 1.5-13.5 *мкм*. При этом если при ручном перемешивании цементной пасты без добавок ПАВ средний размер кристаллов составлял чуть менее 4 *мкм*, то во всех остальных случаях данная величина несколько возросла и варьировалась, в довольно узких пределах, примерно от 6 до чуть более 7 *мкм*. Наиболее крупным средним размером 7.2 *мкм* характеризовались кристаллы этtringита, образовавшегося при ультразвуковом перемешивании цементной пасты в присутствии неионогенного ПАВ ОП-10.

Увеличение времени гидратации до 24 часов, как и ожидалось, приводит к возрастанию размеров кристаллов этtringита, которые варьируют в пределах 3-19 *мкм*. Как и при 4 часовом гидратировании цемента наименее крупным средним размером в примерно в 7 *мкм* характеризуются кристаллы этtringита образовавшегося при ручном перемешивании цементной пасты без каких-либо целевых добавок. Наиболее крупные кристаллы со средним размером примерно 8.5 *мкм* образуются при ультразвуковом перемешивании цементной пасты в присутствии обоих типов ПАВ.

Таким образом, данные рентгенографического анализа и оптической микроскопии указывают на то, что ультразвуковое затворение цементной пасты, а также добавки обоих типов ПАВ (как при ручном, так и ультразвуковом перемешивании) ускоряют процессы гидратации цемента.

Очевидно, что ускорение процессов гидратации цемента должно приводить к более быстрому нарастанию его прочности. С этой целью были испытаны образцы цемента после семи суток гидратации и сравнены с прочностными показателями таких же образцов гидратированных в течение 28 суток (табл. 2).

Действительно из данных, представленных в таблице 2 следует, что образцы затворенные ультразвуковым перемешиванием или с добавками ПАВ, в независимости от метода перемешивания, быстрее достигают предела своей прочности. Это подтверждает влияние указанных выше факторов на ускорение процессов гидратации цемента.

Однако несмотря на то, что эти факторы стимулируют процессы гидратации цемента, прочностные показатели лишь двух образцов (как после 7, так и после 28 суток гидратации) выше чем у образца затворенного ручным перемешиванием без всяких добавок. Это образцы

полученные ультразвуковым перемешиванием цементной пасты без добавок эмульгаторов или ручным перемешиванием, но с добавкой неионогенного ПАВ ОП-10.

Таблица 2

Прочность на сжатие образцов цемента после 7 суток гидратации

№	Метод перемешивания	ПАВ	Прочность на сжатие, МПа	%-ое отношение к прочности после 28 с гидратации
1	Ручное	-	23.7	~50
2	“_”	ОП-10	33.7	~64
3	“_”	ЛСН	19.5	~53
4	УЗ	-	33.3	~64
5	УЗ	ЛСН	17.6	~63

Для того, чтобы понять почему так происходит были проведены дополнительные микроскопические исследования образцов затвердевших после 28 суток гидратации цемента.

Данные оптической микроскопии свидетельствуют о том, что в независимости от метода затворения цементной пасты в затвердевшем материале наблюдаются крупные поры размером превышающие 150 мкм и достигающие в некоторых случаях почти до 900 мкм. Однако в случае ручного или ультразвукового перемешивания без добавок ПАВ, а также в случае ручного перемешивания с использованием неионогенного эмульгатора ОП-10 эти поры достаточно редки и хаотически распределены в окаменевшем цементе. Пористость этих образцов примерно одинакова и, в основном, колеблется в пределах 20-60 мкм (рис. 2, а-в). Поэтому повышенная прочность затвердевшего цемента затворенного методами ультразвукового (без каких-либо добавок) или ручного перемешивания в присутствии ОП-10, видимо, обусловлена более быстрыми темпами гидратации цемента в данных условиях по сравнению со случаем когда применяется обычное ручное перемешивание без добавок ПАВ.

Если при ручном затворении цементной пасты в присутствии ОП-10 размер крупных пор не превышает 500 мкм, то применение ультразвукового перемешивания в данном случае способствует образованию, хоть и небольшого количества, но более крупных пор размером вплоть до 800 мкм (рис. 2, г), что приводит к некоторому снижению прочности соответствующего материала.

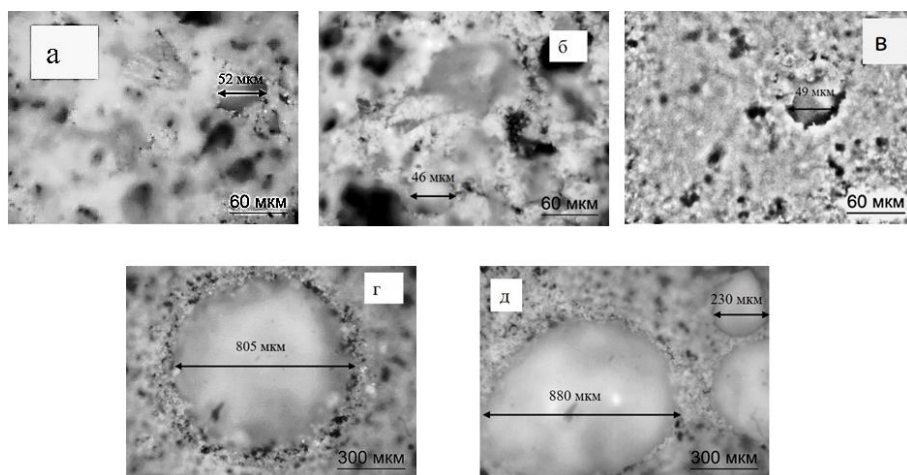


Рис. 2. Микроскопические снимки затвердевших после 28 суток гидратации образцов цемента, затворенных: а – ручным перемешиванием без добавок ПАВ; б – ручным перемешиванием + ОП-10; в – ультразвуковым перемешиванием без добавок; г – ультразвуковым перемешиванием + ОП-10; д - ультразвуковым перемешиванием + ЛСН.

Наибольшее количество крупных пор, достигающих размером 700-900 мкм, образуются в цементе, затворенном в присутствии анионного ПАВ лаурилсульфата натрия, особенно при использовании ультразвукового перемешивания. Местами совокупность этих пор образует довольно крупные дефекты в цементном материале (рис. 2, д), в результате чего его прочность существенно снижается.

Таким образом, методами рентгенографического анализа и оптической микроскопии установлено, что ультразвуковое затворение цементной пасты, а также добавки как анионного, так и неионогенного ПАВ (как при ручном, так и ультразвуковом перемешивании) ускоряют процессы гидратации цемента. Испытания прочности на сжатие образцов цемента после семи дней гидратации, то есть на ее ранних стадиях, также приводят к аналогичному заключению. Установлено, что наиболее прочными после 28 суток гидратации являются образцы полученные ультразвуковым перемешиванием цементной пасты без добавок эмульгаторов или ручным перемешиванием, но с добавкой неионогенного ПАВ ОП-10, что, по-видимому, обусловлено сравнительно низкой пористостью образующихся материалов и более высокой скоростью их гидратации.

Для лучшего понимания влияния различных факторов на процессы гидратации цемента будут проведены дополнительные исследования. В частности, будет изучено влияние мощности и времени ультразвукового перемешивания, концентрации и типа ПАВ (включая катионные

эмульгаторы) на время схватывания цементной пасты, структуры, механические и другие свойства образующихся материалов.

Экспериментальная часть

В исследованиях использовался портландцемент марки 42.5 Н. Дисперсность используемого цементного порошка определялось на сите с контрольной сеткой N008 согласно ГОСТ 0613. Остаток на сите составлял 5% от первоначальной массы цемента.

Основным параметром затворения цемента является водоцементное соотношение. Правильное соотношение воды и цемента будет влиять как на густоту цементной пасты, с целью обеспечения ее стандартной консистенции, так и на прочность и долговечность конечного материала. Практический диапазон водоцементного соотношения колеблется от 0.3 до 0.8, что дает жесткий и слабый бетон, соответственно. Нами было проведено затворение цемента при массовом соотношении вода/цемент = 0.35.

Затворение цементной пасты водой проводилось как ручным перемешиванием (в течение 5 мин), так и методом ультразвукового перемешивания с применением аппарата Ultrasonic Processor UP200St. Ультразвуковое перемешивание цементной пасты осуществлялось при мощности 95 W в течение 2 мин.

В качестве поверхностноактивных добавок использовались как анионное (лаурилсульфат натрия), так и неионогенное ПАВ ОП-10, представляющий собой продукт обработки смеси моно- и диалкилфенолов окисью этилена.

Концентрации водных растворов ЛСН и ОП-10 составляли 0.1 и 0.008%, соответственно, т.е. не превышали их критическую концентрацию мицеллообразования.

Для определения прочности на сжатие полученных материалов были сформированы образцы в виде кубиков размером 3×3×3 см (уплотнение кубиков проводилось 60 ударами на встряхивающей установке).

Через 24 ч образцы расформировывались и хранились в специальных камерах при 20 ± 2 °C и относительной влажности $95 \pm 5\%$.

Испытания на прочность образцов гидратированного цемента проводили на механическом прессе при скорости на сжатие 3 мм/мин.

**ՄԱԿԵՐԵՎՈՒԹԱՅԻՆ ԱԿՏԻՎ ՆՅՈՒԹԵՐԻ ԵՎ ԽԱՌՆՄԱՆ ՄԵԹՈԴԻ
ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՑԵՄԵՆՏԻ ՀԻՂՐԱՏԱՑՄԱՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՅԻ ԵՎ
ԱՄՐՈՒԹՅԱՆ ՎՐԱ**

**Ս.Մ. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ, Լ.Գ. ԲԱԳԻՆՈՎԱ, Կ.Գ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա.Ա. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ,
Կ.Ն. ԷԴԻԼՅԱՆ, Ս.Մ. ՅԱՅԼՈՅԱՆ**

Հետազոտության նպատակն է ուսումնասիրել ցեմենտի մածուկի խառնըման մեթոդների ազդեցությունը, մասնավորապես, ուլտրաձայնի կիրառումը այս գործընթացում, տարբեր տեսակի մակերևութային ակտիվ նյութերի, ինչպես նաև երկու մոտեցումների համակցման ազդեցությունը ցեմենտի հիդրատացման գործընթացի և ստացված նյութի ամրության վրա: Նատրիումի լաուրիլ սուլֆատը օգտագործվել է որպես իոնոգեն մակերևութային ակտիվ նյութ, իսկ ՕՊ-10-ը՝ որպես ոչ իոնոգեն նյութ: Ռենտգենյան վերլուծության, օպտիկական մանրադիտակի, ինչպես նաև ցեմենտի նմուշների ամրության փորձարկումների արդյունքները հիդրատացման վաղ փուլերում ցույց են տալիս, որ ցեմենտի մածուկի ուլտրաձայնային խառնուրդը, ինչպես նաև երկու տեսակի մակերևութային ակտիվ նյութերի հավելումները (ինչպես ձեռքով, այնպես էլ ուլտրաձայնային խառնում) արագացնում են ցեմենտի հիդրատացման գործընթացները: Հաստատվել է, որ հիդրատացումից 28 օր հետո առավել դիմացկուն են այն նմուշները, որոնք ստացվել են ցեմենտի մածուկի ուլտրաձայնային մշակումից հետո՝ առանց էմուլգատոր հավելումների, կամ ձեռքով խառնելով, բայց ոչ իոնոգեն մակերևութային ակտիվ ՕՊ-10 նյութի ավելացմամբ:

**THE EFFECT OF SURFACTANTS AND MIXING METHOD ON THE
HYDRATION AND STRENGTH OF CEMENT**

**S.M. HAYRAPETYAN, L.G. BAGINOVA, K.G. GRIGORYAN, A.A. KHACHATRYAN,
K.N. EDILYAN, S.M. YAYLOYAN**

Institute of General and Inorganic Chemistry after M.G. Manvelyan of the National Academy of
Sciences of the Republic of Armenia, 0051, Yerevan, Argutyan St., 2 Lane, 10.
E-mail: surenh2003@yahoo.com

The aim of the research was to study the effect of cement paste mixing method, particularly, using ultrasonication, different surfactants as well as the combination of both approaches on the processes of cement hydration and the strength of the resulting material. Sodium lauryl sulfate was used as an anionic surfactant, and OP-10 was used as a nonionic surfactant. The results of X-ray analysis, optical microscopy data as well as strength tests of cement samples at the early stages of hydration show that the ultrasonic mixing of the cement paste, as well as the addition of two types of surfactants (both with manual and ultrasonic mixing) accelerate the processes of cement hydration. After 28 days of hydration, the most durable samples were obtained after ultrasonic treatment of

cement stone without emulsifier additives or by manual mixing, but without the addition of anionic surfactant OP-10.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Misak P., Kucharczyková I B., Kocáb D., Vymazal T.* - Ultrasonic NDT determination of initial and final setting time of cement paste // 4th International Scientific Conference Structural and Physical Aspects of Construction Engineering (SPACE 2019). MATEC Web of Conferences 2020, v. 310, 00027.
- [2] *Thomas J.J., Biernacki J.J., Bullard J.W., Bishnoi Sh., Dolado J.S. Scherer G.W., Luttge A.* - Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development // *Cem. Concr. Res.*, 2011, v. 41, p.p. 1257-1278.
- [3] *Peters S.* - Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur. "The Influence of Power Ultrasound on Setting and Strength Development of Cement Suspensions", Weimar, Bauhaus-Universität, 2016, p. 146.
- [4] *Ganjan E., Ehsani A., Mason Timothy J., Tyrer M.* - Application of power ultrasound to cementitious materials: Advances, issues and perspectives // *Mater.Des.*, 2018, v.160, p.p. 503-513.
- [5] *Draganović A., Karamanoukian A., Ulriksen P., Larsson S.* - Dispersion of microfine cement grout with ultrasound and conventional laboratory dissolvers // *Constr Build Mater*, 2020, v. 251, 119068.
- [6] *Shin J.H., Moon J.H., Park S.H., Kim Y.U.* - Effect of ultrasonic physical properties of cement grout // *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics*, 2013, v. 34, p.p. 443-444.
- [7] *Kashani A., Ngo T.D., Nguen T.N., Hajimohammadi A., Sinaie S., Mendis P.* - The effects of surfactants on properties of lightweight concrete foam // *Mag. Concr. Res.*, 2020, v. 72, № 4, p.p. 163-172.
- [8] *Runova R., Gots V., Rudenko I., Konstantynovskyi O., Lastivka O.* - The efficiency of plasticizing surfactants in alkali-activated cement mortars and concretes // 7th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings" (Transbud-2018). MATEC Web Conferences, 2018, v. 230, 03016.
- [9] *Kligys M., Laukaitis A., Sinica M., Sezemanas G.* - The influence of some surfactants on porous concrete properties // *Mater. Sci. (MEDŽIAGOTYRA)*, 2007, v. 13, No. 4, p.p. 310-316.
- [10] *Feneuil B., Pitois O., Roussel N.* - Effect of surfactants on the yield stress of cement paste // *Cem Concr Res*, 2017, v. 100, p.p. 32-39.
- [11] *Tarnarutskii G.M., Shubert, G.N.* - Effect of complex surfactants on the principal physicomaterial properties of mortars and concretes // *Hydrotechnical Construction*, 1971, v. 5, p.p. 621-626.
- [12] *Liu Q., Chen Z., Yang Y.* - Study of the air-entraining behavior based on the interactions between cement particles and selected cationic, anionic and nonionic surfactants // *Materials*, 2020, v. 13(16), 3514.
- [13] *Mendes J.C., Moro T.K., Figueiredo A.S., Silva K.D.D.C., Silva, G.C., Silva, G.J.B., Peixoto R.A.F.* - Mechanical, rheological and morphological analysis of cement-based composites with a new LAS-based air entraining agent // *Constr Build Mater.*, 2017, v. 145, p.p. 648-661.
- [14] *Tuskaeva Z., Karyayev S.* - Influence of various additives on properties of concrete // *E3S Web of Conferences*, 2020, 164, 14007.

- [15] *Kawashima Sh., Seo J-W. T., Corr D., Hersam M.C., Shah S.P.* - Dispersion of CaCO₃ nanoparticles by sonication and surfactant treatment for application in fly ash–cement systems // *Mater Struct*, 2014, v. 47, p.p. 1011-1023.
- [16] *Liu J., Jiali Fu J., Yang Y., Chunping Gu C.* - Study on dispersion, mechanical and microstructure properties of cement paste incorporating graphene sheets // *Constr Build Mater.*, 2019, v. 199, p.p. 1-11.
- [17] *Taylor H.F.W.* *Cement Chemistry*, 2nd Ed., Academic Press, London, 1997, 459 p.
- [18] *Diamonds S., Dolch W. L., White Joe. L.* – Study on tobermorite-like calcium silicate hydrates // *Research on aggregate, cement, concrete and epoxy bonding* // Highway Research Board (HRB), 1964, issue 62, p.p. 62-79.
- [19] *Silva1 L.A., B. O. Nahimel B.O., Lima E.C., Akasaki J.L., Reis I.C.* - XRD investigation of cement pastes incorporating concrete floor polishing waste // *Ceramica*, 2020, v. 66 p.p. 373-378.
- [20] *Kontoleonos F., Tsakiridis P., Marinosa A., Katsiotisa N., Kaloidasc V., Katsiotia M.* - Dry-grinded ultrafine cements hydration. Physicochemical and microstructural characterization // *Mater. Res.*, 2013, v. 16, p.p. 404-416.
- [21] *Hernandez N., Lizarazo-Marriaga J., Rivas M.A.* - Petrographic characterization of portlandite crystal sizes in cement pastes affected by different hydration environments // *Constr Build Mater.*, 2018, v.182, p.p. 541-549.
- [22] *Руденко Н. Н.* - Особенности процесса структурообразования активированной цементной матрицы бетона // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 2004, с.150-153.