



УДК: 666.972.16

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.1

EDN: BKAWQL

Влияние механоакустической активации волластонита на структуру и прочность цементного камня

С. А. Шахов¹

¹Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Перспективным способом улучшения свойств цементных композитов, является наполнение матрицы цементного вяжущего высокодисперсными минеральными частицами различного генезиса и морфологии. Эффективность минеральных добавок возрастает, когда такие частицы играют роль затравки, то есть активных центров, вокруг которых группируются вновь образующиеся структурные элементы цементного камня, способствуя упрочнению контактной зоны между цементным камнем и заполнителем. Вместе с тем сведения о состоянии структурирующих добавок в активированных растворах, о влиянии их дисперсности на структуру и прочностные характеристики цементного камня крайне ограничены, что затрудняет разработку научно обоснованных подходов к достижению целевых эффектов улучшения физико-механических свойств бетонных изделий.

Цель работы состояла в получении количественной оценки влияния ультразвуковой обработки водных суспензий механически активированного волластонита на изменение структурно-фазовых параметров и прочности цементного камня.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- изучено влияние ультразвуковой обработки водной суспензии волластонита на размер частиц дисперсной фазы;

- исследовано влияние дисперсного состава механоакустически активированного волластонита на фазовый состав, пористость и прочность на сжатие цементного камня.

Результаты. В результате последовательной механической и акустической обработки обеспечивается дискретизация дисперсной фазы до размеров менее 1 мкм. Установлено, что использование водных суспензий с механоакустически активированным волластонитом для затворения цемента способствует повышению механической прочности цементного камня по сравнению с контрольным образцом. Механизм упрочняющего действия добавки проясняют результаты рентгенофазового анализа и оценки параметров поровой структуры цементного камня. Полученные данные подтверждают гипотезу о роли частиц волластонита наномасштабного уровня (фракция < 1 мкм) как активных центров кристаллизации, вокруг которых, способствуя упрочнению цементного камня, группируются вновь образующиеся минералы цементного камня.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что посредством механоакустической обработки можно повысить активирующий потенциал минеральных добавок используемых для модификации цементов.

Ключевые слова: портландцемент, волластонит, механическая активация, ультразвуковая обработка, фракционный состав, прочность цементного камня

Для цитирования: Шахов С.А. Влияние механоакустической активации волластонита на структуру и прочность цементного камня // Известия КГАСУ, 2024, № 4(70), с. 8-18, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.1, EDN: BKAWQL

Effect of mechanoacoustic activation of wollastonite on the structure and strength of cement stone

S.A. Shakhov¹,

¹Siberian State Transport University,
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* A promising method for improving the properties of cement composites is to fill the matrix of the cement binder with highly dispersed mineral particles of various genesis and morphology. The effectiveness of mineral additives increases when such particles act as a seed, i.e. active centers around which newly formed structural elements of the cement stone are grouped, helping to strengthen the contact zone between the cement stone and the filler. At the same time, information on the state of structuring additives in activated solutions, on the effect of their dispersion on the structure and strength characteristics of the cement stone is extremely limited, which complicates the development of scientifically sound approaches to achieving the target effects of improving the physical and mechanical properties of concrete products.

The purpose of the work is to quantitatively assess the effect of ultrasonic treatment of aqueous suspensions of mechanically activated wollastonite on changes in the structural-phase parameters and strength characteristics of the cement stone. The following objectives of the study are distinguished:

- the effect of sequential mechanical and acoustic treatment on the particle size of the dispersed phase of aqueous suspensions was studied;
- the effect of the dispersed composition of mechanoacoustically activated wollastonite on the phase composition and strength characteristics of cement stone was investigated.

Results. As a result of successive mechanical and acoustic treatment, the dispersed phase is discretized to sizes less than 1 μm . It was found that the use of aqueous suspensions with mechanoacoustically activated wollastonite for cement mixing helps to increase the mechanical strength of cement stone compared to the control sample. The mechanism of the strengthening effect of the additive is clarified by the results of X-ray phase analysis and assessment of the parameters of the pore structure of cement stone. The data obtained confirm the hypothesis about the role of nanoscale wollastonite particles as active crystallization centers, around which newly formed minerals of cement stone are grouped, promoting the strengthening of cement stone.

Conclusions. The significance of the results for the construction industry is that mechanoacoustic treatment can be used to increase the activating potential of mineral additives used to modify cements.

Keywords: Portland cement, wollastonite, mechanical activation, ultrasonic treatment, fractional composition, strength of cement stone

For citation: Shakhov S.A. Effect of mechanoacoustic activation of wollastonite on the structure and strength of cement stone // News of KSUAE, 2024, № 4(70), p. 8-18, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.1, EDN: BKAWQL

1. Введение

В настоящее время к цементным бетонам, являющимся одним из основных конструкционных строительных материалов, предъявляются все более высокие требования в части минимизации расхода материальных и энергетических ресурсов. Вопросы экономии цемента, как дорогостоящего компонента бетона, неразрывно связаны с необходимостью поиска новых путей модификации неорганических вяжущих материалов.

Перспективным способом улучшения свойств цементных композитов, является наполнение матрицы цементного вяжущего высокодисперсными минеральными частицами различного генезиса и морфологии. Анализ литературных данных свидетельствует, что в качестве модификаторов для этой цели могут быть использованы порошки из горных пород или техногенных отходов, номенклатура

которых в настоящее время достаточно обширна [1-3]. Как правило, это активные минеральные добавки (АМД), связывающие при твердении известь. Вместе с тем в ряде работ [4, 5], показано, что химически неактивные к клинкерным минералам высокодисперсные кристаллические минералы, в частности волластонит, могут оказывать положительный эффект на структурно-механические характеристики цементного камня. Согласно данным [4] максимальный эффект (увеличение активности цемента на 40-60%) достигается при содержании в цементе волластонита в количестве 6-9%. Однако востребованность волластонита в других отраслях, небольшие запасы и объемы его добычи накладывают ограничение на массовое использование таких порошков при производстве цементных вяжущих. С учетом этого представляет интерес поиск новых технологических решений, обеспечивающих получение эффекта при меньшем расходе волластонита.

Согласно современным физико-химическим представлениям о гидратации и твердении цемента эффективность минеральных добавок возрастает, когда такие частицы играют роль затравки, то есть активных центров, вокруг которых группируются вновь образующиеся структурные элементы цементного камня, способствуя упрочнению контактной зоны между цементным камнем и заполнителем [1,6]. Положительный эффект от создания активных центров с помощью частиц – затравок связывают с их размером. При этом авторы работ [7, 8] отмечают, что при одинаковом содержании минеральных добавок, прочность цементов изменяется обратно пропорционально среднему диаметру их частиц.

Наряду с размером частиц прочность цементного камня зависит также от габитуса кристаллической затравки, обычно увеличиваясь, когда вводимые частицы имеют игольчатую или длиноволокнистую форму кристаллов [4, 9].

Поскольку гидросиликаты кальция кристаллизуются из пересыщенных растворов, в которых скорость процесса не лимитируется концентрацией кристаллизующегося вещества [6], необходимым условием для ускорения кристаллизации в микрообъеме каждой цементной частицы является наличие достаточного количества активных центров. Результаты исследования зависимости прочности мелкозернистого бетона от дисперсности и массовой доли добавок, приведенные в работе [7, 8, 10-12], свидетельствуют, что с уменьшением дисперсности инертной минеральной добавки снижается ее оптимальное количество, обеспечивающее повышение скорости и равномерности формирования пространственной структуры цементного камня.

С технологической точки зрения есть два фактора затрудняющих использование высокодисперсных минеральных порошков для создания активных центров в цементном растворе. Во-первых, в большинстве такие порошки консолидированы в достаточно плотные агрегаты. Во-вторых, традиционные методы дезагрегации с помощью механических воздействий не эффективны по отношению к объектам такого класса. А, если не удастся разрушить агрегаты, то активирующее действие введенной добавки резко уменьшается, так как нереализованным оказывается основное преимущество высокодисперсного порошка – возможность образовывать большее количество контактов при очень небольшом его содержании.

Повысить эффективность диспергирования минеральных агрегатов можно с помощью ультразвукового воздействия [13, 14]. Существует ряд достаточно обоснованных представлений о механизме ультразвукового диспергирования согласно которым, причиной разрушения частиц и агрегатов может быть, как ударная волна, так и акустические течения, возникающие при микровзрыве кавитационного пузырька [15]. Вместе с тем сведения о состоянии структурирующих добавок в активированных растворах, о влиянии их дисперсности на структуру и прочностные характеристики цементного камня крайне ограничены, что затрудняет разработку научно обоснованных подходов к достижению целевых эффектов улучшения физико-механических свойств бетонных изделий.

Цель работы состояла в получении количественной оценки влияния ультразвуковой обработки водных суспензий механически активированного волластонита на изменение структурно-фазовых параметров и прочности цементного камня.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- изучено влияние ультразвуковой обработки водной суспензии волластонита на размер частиц дисперсной фазы;
- исследовано влияние дисперсного состава механоакустически активированного волластонита на фазовый состав, пористость и прочность на сжатие цементного камня.

2. Материалы и методы

Для проведения исследований использованы:

- портландцемент производства ОАО «Искитимский цемент» марки ЦЕМ II/A-III 32,5Б. Минералогический состав цемента: мас. %: C_3S – $64,0 \pm 1,5$; C_2S – $15,0 \pm 1,2$; C_3A – $6,0 \pm 0,8$; C_4AF – $11,0 \pm 1,1$.
- порошок природного волластонита Синохинского месторождения, приготовленный путем измельчения ($S_{уд.}$ 2976 $см^2/г$) в валковой мельнице.

Исходные порошок волластонита подвергали механической активации в планетарной мельнице PULVERISETTE 6, после чего использовали для приготовления водной суспензии, которую обрабатывали ультразвуком в технологическом аппарате «Волна-М» (модель УЗТА 1,0/22ОМ) и применяли для затворения цемента. Исследование дисперсного состава порошков проводили на фотоседиментометре ФСХ-6.

Гранулометрический состав порошков волластонита после механической активации в планетарной мельнице приведен на рисунке 1.

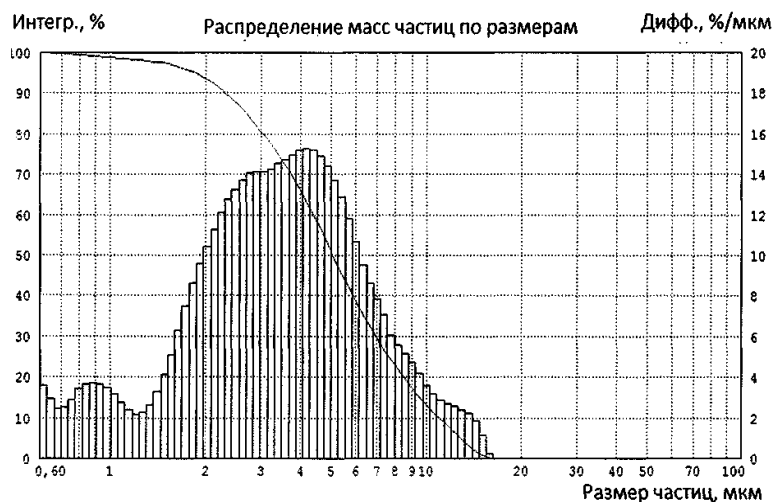


Рис. 1. Гранулометрический состав порошка волластонита после обработки ($t=30$ мин.) в планетарной мельнице (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Granulometric composition of wollastonite powder after processing ($t=30$ min.) in a planetary mill (illustration by the authors)

Испытания цементного камня на прочность при сжатии проводили на образцах размером $2,0 \times 2,0 \times 2,0$ см. Оценка пористости цементного камня осуществлялась методом низкотемпературной адсорбции и десорбции паров азота на газовом сорбционном анализаторе. Рентгенофазовый анализ образцов выполнен на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 ($\lambda = 1,54178$). Расшифровка дифрактограмм проводилась по данным картотеки PDF. Термогравиметрические кривые были получены с помощью микротермовесов TG 209 F1. Массы образцов были в пределах 30 мг, скорость нагрева 10 град/мин.

3. Результаты и обсуждение

Результатом последовательной механической и акустической обработки волластонита является дискретизация дисперсной фазы, которая сохраняется на технологически приемлемый период времени, составляющий не менее 2 часов. При этом изменение характеристик степени измельчения и агрегации порошков - удельной поверхности от времени обработки ультразвуком и среднеквадратичного диаметра частиц (d_{cp}), носят волнообразный характер, что является следствием протекания процессов диспергирования и коагуляции, которые могут быть отнесены к механической

динамической активации, протекающей за счет кавитации и взаимного трения быстро движущихся и соударяющихся частиц (рис. 2).

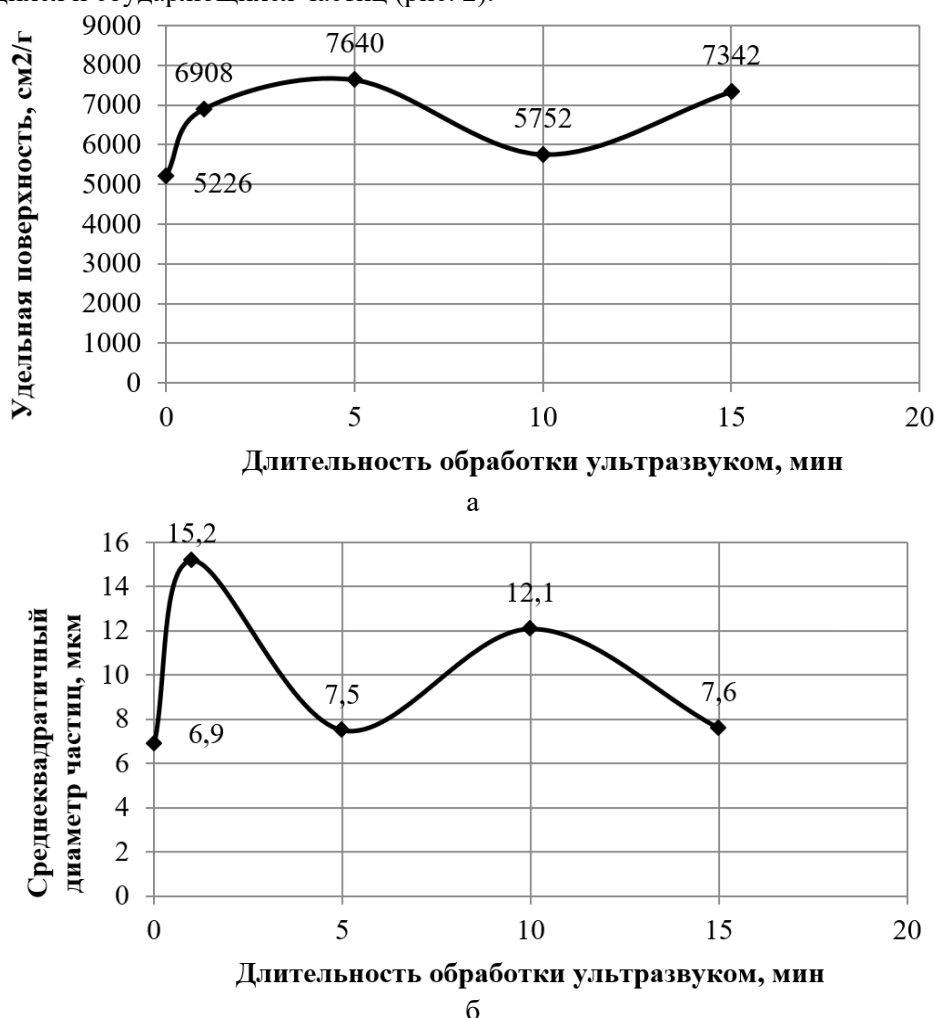


Рис. 2. Изменение удельной поверхности (а), и среднеквадратичного диаметра частиц (б) wollastonita в зависимости от длительности обработки ультразвуком (иллюстрация авторов)
 Fig. 2. Change in the specific surface area (a) and root-mean-square diameter of the particles (b) of wollastonite depending on the duration of ultrasonic treatment (illustration by the authors)

В начальный период ультразвуковой обработки (0–5 мин) ударное воздействие ультразвуковой волны, интенсивные движения частиц и столкновения их друг с другом вызывают разрыв связей между частицами дисперсной фазы, что приводит к увеличению свободной поверхностной энергии, (более чем в 10 раз) [16]. Возросшие при этом молекулярные силы препятствуют дальнейшему разрушению частиц и агрегатов. Поэтому при дальнейшей обработке суспензии скорость диспергирования замедляется, начинается процесс агрегирования частиц. При этом следует отметить, что вследствие коагуляции восстановление прежнего до диспергирования состояния полидисперсной системы, как правило, не происходит. Образовавшиеся за счет более высокой удельной поверхностной энергии вокруг фрагментов агрегатов и мелких частиц сольватные оболочки, не дают ван-дер-ваальсовым силам полностью сблизить и объединить их в единое целое [17,18].

Учитывая закономерность увеличения количества частиц, заполняющих единицу объема, при уменьшении их размера, представляется логичным рост числа частиц наномасштабного уровня (фракция <1 мкм) при уменьшении размерного параметра (d_{cp}) (рис.3).

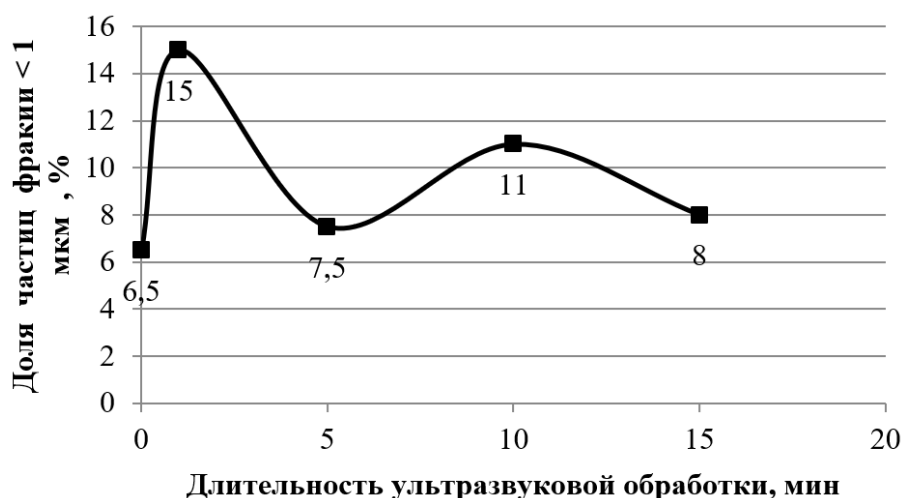


Рис. 3. Изменение фракционного состава волластонита в зависимости от длительности обработки ультразвуком (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Change in the fractional composition of wollastonite depending on the duration of ultrasound treatment (illustration by the authors)

С технологической точки зрения последовательную механическую и ультразвуковую обработку порошков следует рассматривать как единый процесс механоакустической активации, механизм протекания которого связан с диспергированием посредством кавитации образовавшихся в процессе механической активации агрегатов. При этом учитывая, что количество частиц фракции < 1 мкм оказывает ключевое влияние на изменение удельной поверхности порошка – параметра в значительной степени определяющего активирующую способность минеральной добавки [19], долю частиц фракции < 1 мкм можно считать критерием эффективности ультразвукового диспергирования и дезагрегации минеральных добавок, максимизация которого будет способствовать росту количества активных центров и соответственно повышению активности минеральной добавки.

Затворение цемента водной суспензией, содержащей 0,6 % (от массы цемента) механоакустически активированного волластонита, приводит к росту прочностных показателей цементного камня по мере увеличения удельной поверхности порошка (рис. 4).

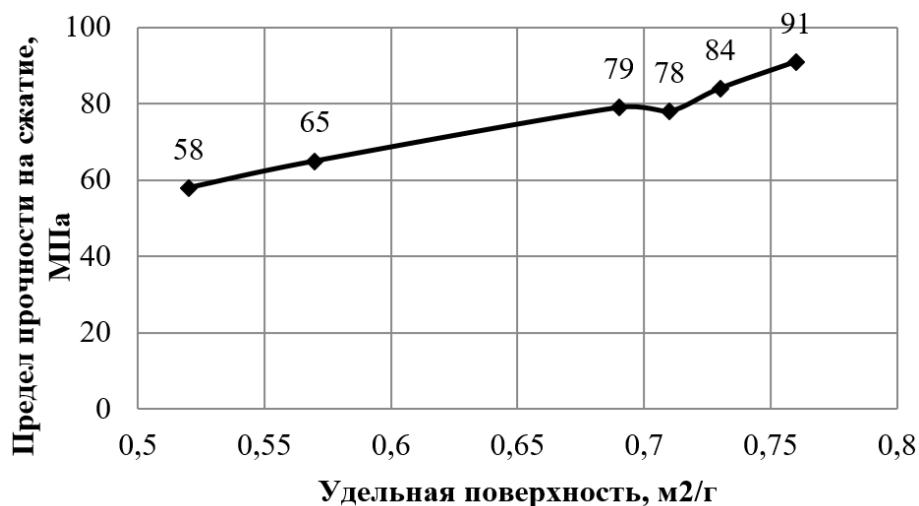


Рис. 4. Изменение предела прочности цементного камня в зависимости от величины удельной поверхности порошка волластонита (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Change in the ultimate strength of cement stone depending on the specific surface area of wollastonite powder (illustration by the authors)

В максимальной степени эффект проявляется у образцов с максимальным содержанием фракции < 1 мкм ($t_{\text{узв}} = 1$ мин): к 28 суткам образцы с добавкой в таком

количестве имели на 51 % большую прочность, чем прочность образцов бездобавочного цемента, что подтверждает исходную гипотезу о роли высокодисперсных частиц как активных центров, вокруг которых, способствуя упрочнению цементного камня, группируются вновь образующиеся минералы цементного камня.

Известно [1, 6], что для ускорения кристаллизации в микрообъеме каждой цементной частицы должно быть достаточное количество активных центров. Оптимальной концентрацией активированной добавки волластонита, приводящей к максимальной прочности, является величина 0,6% от массы цемента, дальнейшая дозировка приводит к снижению прочности (рис. 5). Примечательно, что эквивалентные изменения прочностных характеристик при использовании добавки волластонита не подвергавшейся механоакустической активации достигаются при введении ее в состав цементного вяжущего в количестве 6 - 9 % [4]. Следует отметить, что полученные результаты согласуются с данными других исследователей, в частности [20 - 22], установивших, что наибольший технологический эффект от модифицирования строительных материалов проявляется в области малых концентраций нанодобавок.



Рис. 5. Изменение предела прочности цементного камня в зависимости от количества добавки волластонита активированного механоакустическим методом (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Change in the ultimate strength of cement stone depending on the amount of wollastonite additive activated by the mechanoacoustic method (illustration by the authors)

Учитывая, что влияние инертных в химическом отношении к цементным минералам и играющих роль активных центров частиц зависит от их размера и количества, с помощью физико-химических методов были проанализированы изменения в структуре и фазовом составе цементного камня при использовании добавки механоакустически активированного волластонита с повышенным содержанием частиц фракции < 1 мкм.

На дериватограммах образцов цементного камня с добавками волластонита и образцов без добавок (табл. 1) после 28 суток твердения наблюдается несколько эндотермических эффектов, которые определяют дегидратацию соответствующих гидратных соединений. Первый, достаточно большой эндотермический эффект, представляющий сумму двух эндотермических эффектов процесса дегидратации гидросиликатов и этtringита наблюдали при 140–150°C. Второй, относительно небольшой эндотермический эффект при 480–510°C, соответствует дегидратации портландита. Кроме того, отмечено наличие не большого эффекта, составляющего сумму двух эндотермических эффектов области 800–820°C принадлежащего разложению карбоната кальция и переходу гидросиликатов кальция в волластонит.

Анализ результатов ДТА показал, что общая потеря массы в образцах без добавок через 28 суток было меньше на 13% по сравнению с образцами с добавкой волластонита в количестве 0,6 %% и на 6% по сравнению с образцами с добавкой волластонита в количестве 6%. При этом у образцов с добавкой волластонита отмечено смещение

температур эндоэффектов в область более высоких значений. Такие особенности соответствуют повышению прочности цементного камня.

Таблица 1

Термические эффекты и изменение массы цементного камня

Количество волластонита, % мас.	1-й эндоэффект		2-й эндоэффект		3-й эндоэффект		Общая потеря массы, %
	T, °C	Δm , %	T, °C	Δm , %	T, °C	Δm , %	
0	103,14	6,261	471,35	3,491	732,55	1,880	11,63
0,6	103,22	7,090	471,36	3,354	733,46	3,016	13,46
6	106,26	5,911	475,67	3,197	760,92	3,191	12,30

На рентгенограммах (рис. 6) у всех образцов после 28 суточного твердения присутствовали дифракционные максимумы с $d = 9,71; 5,6; 3,89; 2,43 \text{ \AA}$ и др., указывающие на присутствие этtringита; гидросиликата кальция C-S-H (II) с $d = 9,8; 3,08; 2,85; 2,40; 1,83; 1,56 \text{ \AA}$; портландита Ca(OH)_2 с $d = 4,93; 3,11; 2,63; 1,92; 1,79; 1,49 \text{ \AA}$ и непрореагировавшего алита C3S с $d = 3,03; 2,77; 2,6 \text{ \AA}$.

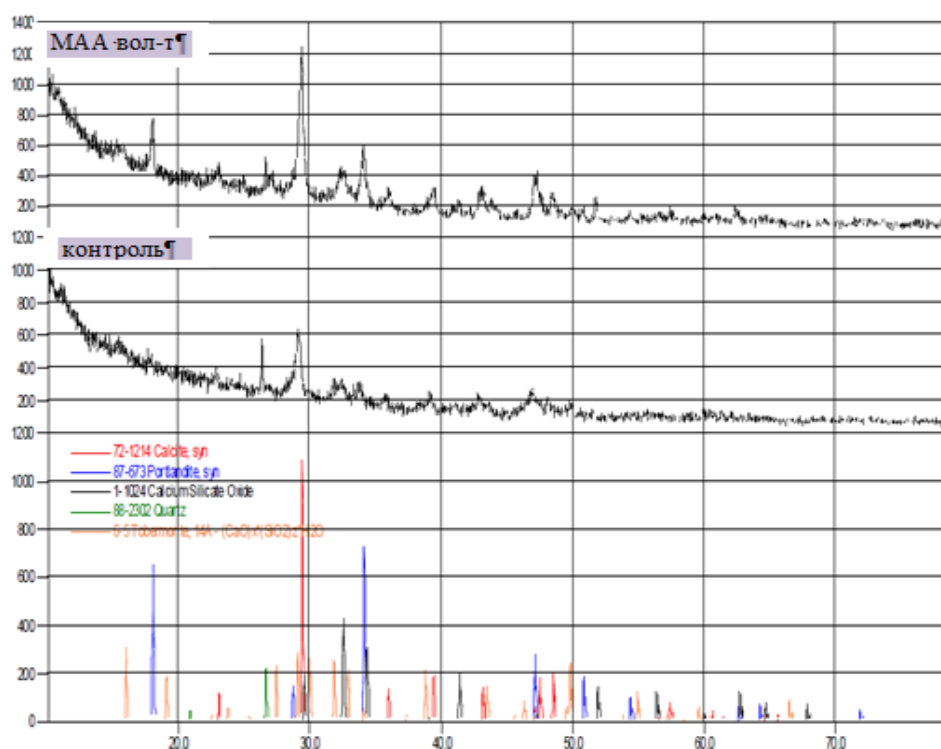


Рис. 6. Сравнение рентгенограмм контрольного образца и образца с механоакустически активированным волластонитом (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Comparison of X-ray diffraction patterns of the control sample and the sample with mechanoacoustically activated wollastonite (illustration by the authors)

На рентгенограмме образца цементного камня с добавкой механоакустически активированного волластонита отмечено увеличение интенсивности пиков гидросиликатов и портландида, что позволяет сделать вывод о большей степени гидратации цемента и изменении фазового состава гидратных новообразований в сторону увеличения количества гидросиликатов кальция. Изменение степени гидратации, по-видимому, связано как с увеличением скорости зародышеобразования, так и ростом кристаллов новообразований на вновь образованных активных центрах и в пространстве между частицами. В результате этого увеличивается плотность и число контактов между отдельными гидратами, а, следовательно, повышается как ранняя, так и марочная прочность.

В таблице 2 представлены результаты, характеризующие изменение поровой структуры цементного камня для контрольного образца и образца, полученного с добавкой механоакустически активированного волластонита.

Таблица 2

Характеристики пористости цементного камня

Параметр	Состав цементного вяжущего		
	Портландцемент	Портландцемент с добавкой 0,6% механоакустически активированного волластонита	Портландцемент с добавкой 6% волластонита
Объем пор диаметром 0,15-1,5 мкм, %	0,1683	0,1496	0,1488
Объем пор диаметром 0,003-0,15 мкм, %	0,1020	0,1146	0,1129
итого	0,2703	0,2642	0,2617

Введение добавок волластонита приводит к возрастанию объема и соответственно суммарной поверхности пор малого (менее 150 нм) диаметра. Увеличение количества таких пор может способствовать повышению морозостойкости цементного камня, так как вода в них в основном будет находиться в пленочном состоянии [23-25].

Таким образом, результаты сравнительных исследований физико-химическими методами структуры и фазового состава цементного камня подтверждают сделанное предположение о том, что механизм увеличения прочности цементного камня при использовании добавки механоакустически активированного волластонита обусловлен ростом количества активных центров, прекурсорами которых являются частицы наномасштабного уровня (фракция < 1 мкм).

4. Заключение

1. Последовательную механическую и ультразвуковую обработку порошков целесообразно рассматривать как единый процесс механоакустической активации, механизм протекания которого связан с диспергированием посредством кавитации образовавшихся в процессе механической активации агрегатов.

2. Эффективность влияния добавки механоакустически активированного волластонита на прочность цементного камня прямо пропорциональна удельной поверхности и доле частиц фракции < 1 мкм и обратно пропорциональна среднему размеру частиц.

3. Добавка механоакустически активированного волластонита повышает прочность цементного камня не только в результате увеличения степени гидратации при кристаллизации новообразований на поверхности зерен цемента, но и за счет уплотнения структуры, которое происходит при кристаллизации новообразований, располагающихся в порах цементного камня.

4. Сравнение полученных результатов с результатами других работ показывает, что затворение цемента суспензией, содержащей 0,6% механоакустически активированного волластонита, по степени влияния на прочность цементного камня, эквивалентно введению 6% механоакустически необработанного волластонита.

5. Результаты исследования подтверждают гипотезу о роли частиц наномасштабного уровня (фракция < 1 мкм) как активных центров, вокруг которых, способствуя упрочнению цементного камня, группируются вновь образующиеся минералы цементного камня.

Список литературы / References

1. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: 1998. 768 с. Batrakov V.G. Modified concrete. Theory and practice. M.: 1998. 768 p.
2. Tangadagi R.B., Seth D. Role of mineral admixtures on strength and durability of high strength self-compacting concrete: An experimental study. Materialia. 2021. 18. P. 101144. DOI: 10.1016/j.mta.2021.101144.

3. Scrivener K.L., Nonat A. Hydration of cementitious materials – present and future // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol.41. Issue 7. P. 641-650.
4. Бердов Г. И., Ильина Л.В. Влияние волластонита на прочность цементного камня из длительного хранившегося портландцемента // *Строительные материалы: Научно-технический и производственный журнал*. 2011. № 1. С. 48–49.
Berdov G. I., Ilyina L. V. Effect of wollastonite on the strength of cement stone from long-term stored Portland cement // *Construction materials: Scientific, technical and production journal*. 2011. No. 1. P. 48–49.
5. Овчаренко Г. И., Аввакумов Е.Г., Песоцкий А.В., Викторов А.В. Влияние вида тонкоизмельченных минеральных добавок на прочность цементного камня // *Известия вузов. Строительство*. 2014. № 12. С. 19–24.
Ovcharenko G. I., Avvakumov E. G., Pesotsky A. V., Viktorov A. V. Influence of the type of finely ground mineral additives on the strength of cement stone // *News of universities. Construction*. 2014. No. 12. P. 19–24.
6. Pedrosa H.C., Reales O.M., Reis V.D., Paiva M. das D., Fairbairn E.M.R. Hydration of Portland cement acceleration by C-S-H seeds at different temperature. // *Cement and Concrete Research*. 2020. 129. P. 105978. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.105978
7. Maddalena R., Hall C., Hamilton A. Effect of silica particle size on the formation of calcium silicate hydrate [C-S-H] using thermal analysis // *Thermochimica Acta*. 2019. 668. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.tca.2018.09.003
8. Фокин Г.А., Вилкова, Н.Г., Гусков, А.С. Влияние размеров частиц и их массового содержания в исходной суспензии на прочность цементного камня // *Известия вузов. Строительство*. -2014. №2 С.11-16.
Fokin G.A., Vilkova, N.G., Guskov, A.S. Influence of particle sizes and their mass content in the initial suspension on the strength of cement stone // *News of universities. Construction*. - 2014. No. 2 P. 11-16.
9. Faraj R.H., Mohammed A.A., Omer K.M. Self-compacting concrete composites modified with nanoparticles: A comprehensive review, analysis and modeling. // *Journal of Building Engineering*. 2022. 50. Article No. 104170. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104170.
10. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Мороз М.Н., Троянов И.Ю., Володин В.М., Суздальцев О.В. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов. // *Строительные материалы*. 2014. № 5. С. 88–92.
Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Moroz M.N., Troyanov I.Yu., Volodin V.M., Suzdaltsev O.V. Nanohydrosilicate technologies in concrete production. // *Construction materials*. 2014. No. 5. P. 88–92.
11. Кривобородов Ю.Р., Еленова А.А. Применение микродисперсных добавок для ускорения твердения цемента // *Строительные материалы*. 2016. №9. – С. 65-67.
Krivoborodov Yu.R., Yelenova A.A. Application of microdispersed additives to accelerate cement hardening // *Construction materials*. 2016. No. 9. – P. 65-67.
12. Massana J., Reyes E., Bernal J., León N., Sánchez-Espinosa E. Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete. // *Construction and Building Materials*. 2018. 165. P. 93–103. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.100.
13. Ensminger D., Bond L.J. *Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications*. 4th ed. CRC Press. Boca Raton, 2011. 904 p. DOI: 10.1201/9780429286964.
14. Королев Е.В., Иноземцев А.С. Эффективность физических воздействий для диспергирования наноразмерных модификаторов // *Строительные материалы*. – 2012. – №4 – С. 76-79.
Korolev E.V., Inozemtsev A.S. Efficiency of physical impacts for dispersion of nanosized modifiers // *Construction materials*. – 2012. – No. 4 – P. 76-79.
15. Шахов С.А. Рогова Е.В. Жапбасбаев У.К. Влияние параметров ультразвукового воздействия на дезагрегацию ультрадисперсных порошков // *Техника и технология силикатов*. Том 23, № 2, 2016. Москва С. 14-18.
Shakhov S.A., Rogova E.V., Zhabbasbaev U.K. Influence of ultrasonic parameters on disaggregation of ultrafine powders // *Engineering and technology of silicates*. Vol. 23, No. 2, 2016. Moscow, P. 14-18.

16. Свиридов Д.П., Семенов И.А., Ульянов Б.А. Закономерности и энергетическая эффективность кавитационного измельчения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. №1(29). С.76-81.
Sviridov D.P., Semenov I.A., Ulyanov B.A. Regularities and energy efficiency of cavitation grinding // Modern technologies. System analysis. Modeling. 2011. No. 1 (29). P. 76-81.
17. Balczár I., Korim T., Hullár H., Boros A., Makó É. Manufacture of air-cooled slag-based alkali-activated cements using mechanochemical activation. // Construction and Building Materials. 2017. 137. P. 216–223. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.121.
18. Shakhov S.A., Rogova E.V. Disaggregation of ultrafine powders in conditions of ultrasonic cavitation // Magazine of Civil Engineering, No. 3, 2017. P. 21–29.
19. Shakhov S.A., Rogova E.V. Factors affecting the ultrasonic disaggregation of powders // Magazine of Civil Engineering, No. 4, 2019. P. 14–24.
20. Artamonova O., Chernyshov E., Slavcheva G. Factors and mechanisms of nanomodification cement systems in the technological life cycle. // Magazine of Civil Engineering. 2022. 109(1). DOI:10.34910/MCE.109.6.
21. Gabidullin M.G., Rakhimov R.Z., Khuzin A.F., Suleymanov N.M., Khantimirov S.A., Gabidullin B.M., Rakhimov M.M., Nizembaev A.Sh., Khorev N.M. Manufacturing technology of cnt-based nanomodifier and its effect on the strength of cement stone // Proceedings of the IV International conference “Nanotechnology for green and sustainable construction”. Cairo. 2012. P. 75–84.
22. Morsy M. Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar // Construction and Building Materials. 2010. No.25. P.145-149.
23. Zou D., Li K., Li W., Li H., Cao T. Effects of pore structure and water absorption on internal curing efficiency of porous aggregates. // Construction and Building Materials. 2018. 163. P. 949–959. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.170.
24. Смирнов Д.С., Мавлиев Л.Ф., Хузиахметова К.Р., Мотыйгуллин И.Р. Влияние минеральной добавки на основе молотого доменного шлака на свойства бетонов и бетонных смесей // Известия КГАСУ 2022 № 4(62), С. 61-69, DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61, EDN: KQDLZR
Smirnov D.S., Mavliev L.F., Khuziakhmetova K.R., Motygullin I.R. Effect of mineral additive based on ground blast furnace slag on the properties of concrete and concrete mixtures // News KSUAE 2022 No. 4(62), P. 61-69, DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61, EDN: KQDLZR
25. Морозова Н.Н., Гуляков Е.Г. Свойства бетона на цеолитсодержащем вяжущем // Известия КГАСУ, 2023 № 2 (64), с. 27-39, DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27, EDN: LCQWVC
Morozova N.N., Gulyakov E.G. Properties of concrete based on zeolite containing binder//News KSUAE, 2023 No. 2 (64). P. 27-39, DOI: 10.52409/20731523_2023_2_27, EDN: LCQWVC

Информация об авторах

Шахов Сергей Александрович, доктор технических наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская Федерация
E-mail sashakhov@mail.ru; ORCID: 0000-0003-4981-8359

Information about the authors

Sergey A. Shakhov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russian Federation
E-mail sashakhov@mail.ru; ORCID: 0000-0003-4981-8359