

УДК 666.949

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 81.09.00

Научная специальность ВАК: 2.6.17 Материаловедение (технические науки)

EDN eldefm

DOI 10.62980/2076-0655-2026-413-421

РАСШИРЕНИЕ ЦЕМЕНТА, СВЯЗАННОЕ С ОБРАЗОВАНИЕМ ЭТТРИНГИТА

Трунтов Н.С.¹, Шукшин Ф.Б.¹, Самченко С.В.¹

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

АННОТАЦИЯ

Возрастающий интерес к цементам на основе сульфоалюминатных и сульфоалюмоферритных клинкеров, полученных при более низких температурах, чем портландцементный клинкер, обуславливает необходимость изучения процессов гидратации цементов на их основе. При этом особый интерес вызывает поведение этих цементов при различных режимах твердения и установление продуктов их гидратации, а в частности этtringита и железозамещенного этtringита. Целью данного исследования было изучение кинетики образования этtringита из сульфоалюмината кальция и сульфоалюмоферрита кальция при различных условиях твердения, таких как вода, влажный и сухой воздух, а также установление количества образующегося этtringита и степени расширения образцов. Показано, что образцы, затвердевающие под водой гидратируются быстрее, чем образцы, затвердевающие на влажном воздухе. При этом разница в количестве образовавшегося этtringита не слишком велика. Напротив, процесс гидратации в испытательных образцах, твердевших в сухом воздухе, практически остановился в течение нескольких дней из-за потери значительной части свободной воды в этих условиях. Установлено, что кинетика образования этtringита в исследованных образцах из сульфоалюмоферрита кальция в условиях твердения во влажном воздухе и воде, заметно медленнее, чем при гидратации сульфоалюмината кальция. Пониженное расширение паст из сульфоалюмоферрита кальция обусловлено медленным образованием этtringита при твердении. Сравнение расширения образцов, происходящего во влажном воздухе и в воде, показало, что при одинаковых количествах этtringита расширение больше у образцов, твердевших в воде, что обусловлено повышенным водопоглощением в этих условиях. Таким образом, установлено, что степень расширения, связанного с этtringитом, зависит от условий твердения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: этtringит, железозамещенный этtringит, сульфоалюминат кальция, сульфоалюмоферритный клинкер, кинетика образования этtringита, гидратация, расширение, условия твердения в воде, во влажном и сухом воздухе.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трунтов Н.С., Шукшин Ф.Б., Самченко С.В. Расширение цемента, связанное с образованием этtringита // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С. 413-421. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-413-421>, EDN eldefm.

Type of article - scientific article

OECD 2.05 Materials engineering

PM MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY

EDN eldefm

DOI 10.62980/2076-0655-2026-413-421

CEMENT EXPANSION ASSOCIATED WITH ETTRINGITE FORMATION

Truntov N.S.¹, Shukshin F.B.¹, Samchenko S.V.¹

¹ Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University

ABSTRACT

Interest in cements based on sulfoaluminate and sulfoaluminoferrite clinkers is growing. These clinkers are produced at lower temperatures than Portland cement clinker, which reduces their carbon footprint. Therefore, there is a need to study the hydration processes of cements based on them. Of particular interest is the behavior of these cements under various hardening conditions and the identification of their hydration products, in particular ettringite and iron-substituted ettringite. The aim of this study was to investigate the kinetics of ettringite formation from calcium sulfoaluminate and calcium sulfoaluminoferrite under different curing conditions such as water, humid and dry air. The amount of ettringite formed and the degree of expansion of the samples were also studied. It has been shown that samples hardening under water hydrate faster than samples hardening in humid air. However, the difference in the amount of ettringite formed is not too great. In contrast, the hydration process in testing samples cured in dry air virtually stopped within a few days. This is due to the loss of a significant portion of free water under these conditions. It was established that the kinetics of ettringite formation in the studied calcium sulfoaluminoferrite samples under conditions of hardening in humid air and water is noticeably slower than during the hydration of calcium sulfoaluminate. The reduced expansion of calcium sulfoaluminoferrite pastes is due to the slow formation of ettringite during hardening. A comparison of the expansion of samples occurring in humid air and in water showed that, with the same amounts of ettringite, the expansion is greater in samples hardened in water, which is due to increased water absorption under these conditions. Thus, it was established that the degree of expansion associated with ettringite depends on the curing conditions of the samples.

KEY WORDS: ettringite, iron-substituted ettringite, calcium sulfoaluminate, sulfoaluminoferrite clinker, kinetics of ettringite formation, hydration, expansion, hardening conditions in water, in humid and dry air.

FOR CITATION: Truntov N.S., Shukshin F.B., Samchenko S.V. Cement expansion associated with ettringite formation // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 413 – 421. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-413-421>, EDN eldefm.

ВВЕДЕНИЕ

Возрастающие потребности применения специальных цементов обуславливают необходимость разработки новых видов цементов, сочетающих в себе преимущества существующих специальных цементов. Ограниченность сырьевой базы для производства расширяющихся и напрягающих цементов обусловила необходимость разработки новых составов расширяющихся компонентов и технологий их получения. В этом плане перспективны сульфатированные минералы [1-4]. Известны сульфоалюминат и сульфоферрит кальция, имеющие свои специфические свойства, сочетая которые можно получить цементы с новыми, заранее заданными свойствами. Все эти свойства сочетают в себе сульфоалюмоферриты кальция [5,6].

Сульфоалюминатный клинкер получают обжигом при температурах 1250 – 1350°C сырьевой смеси, состоящей из известняка, глиноземсодержащего компонента и гипса. Температура обжига определяется в зависимости от вида глиноземсодержащего сырья, в качестве которого могут выступать дефицитные бокситы или промышленные отходы. Фазовый состав сульфоалюминатного клинкера представлен сульфоалюминатом кальция (йелимит), белитом, алюмоферритами кальция и другими второстепенными минералами [6,7].

Сульфоалюмоферритный клинкер получают обжигом при температуре 1300°C сырьевой смеси, состоящей из известняка, глинозема и железосодержащих отходов промышленности и гипса. Фазовый состав клинкера представлен алитом, белитом и сульфоалюмоферритами кальция [5].

В настоящее время важной проблемой является уточнение условий формирования и устойчивости этtringита при твердении образцов, содержащих различные алюминатные соединения кальция в своем составе в воде, во влажном и сухом воздухе. Особенно это важно для сухих строительных смесей, так как они наносятся на поверхность бетона тонким слоем или используются в реставрационных работах. Потери значительной части свободной воды в условиях твердения в сухом воздухе может привести к разложению гидратных фаз, снижению прочности цементного камня и его сцепления с поверхностью реставрируемого объекта, и в итоге к снижению долговечности нанесенного слоя смеси [8].

Этtringит является высокосульфатной формой гидросульфоалюмината кальция и содержит до 32 молекул воды ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Этот кристаллогидрат относится к AFt-фазе, представляющей собой твердые растворы или смешанные кристаллы от $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ до $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ [9,10].

Этtringит образуется при гидратации различных неорганических связующих, в том числе и при гидратации и твердении портландцементов. При этом образуется ограниченное количество этой фазы, которое регулирует сроки схватывания [3]. Однако в некоторых цементах кристаллизуется чрезмерное количество образующегося этtringита, что может вызвать расширение и даже растрескивание затвердевшей пасты [2,6]. Очень часто при коррозионном воздействии на бетон в трещинах можно наблюдать кристаллизацию игольчатых кристаллов этtringита [6,8].

В многочисленных исследованиях, посвященных гидратации алюмоферритов кальция и составу новообразований гидратных фаз, показано, что процесс идет медленнее, чем

INTRODUCTION

The growing demand for the use of special cements necessitates the development of new types of cements that combine the advantages of existing special cements. The limited raw material base for the production of expanding and stress-straining cements has necessitated the development of new compositions of expanding components and technologies for their production. In this regard, sulfated minerals are promising [1-4]. Calcium sulfoaluminat and calcium sulfoferrite are known, each having its own specific properties, and by combining them it is possible to obtain cements with new, predetermined properties. All these properties are combined in calcium sulfoaluminoferrites [5,6].

Sulfoaluminat clinker is obtained by firing a raw mixture consisting of limestone, an alumina-containing component and gypsum at temperatures of 1250–1350°C. The firing temperature is determined depending on the type of alumina-containing raw material, which may be scarce bauxite or industrial waste. The phase composition of sulfoaluminat clinker is represented by calcium sulfoaluminat (ye-limite), belite, calcium aluminoferrites and other minor minerals [6,7].

Sulfoaluminoferrite clinker is obtained by firing at a temperature of 1300°C a raw mixture consisting of limestone, alumina, iron-containing industrial waste and gypsum. The phase composition of clinker is represented by alite, belite and calcium sulfoaluminoferrites [5].

At present, an important problem is to clarify the conditions of formation and stability of ettringite during the hardening of samples containing various calcium aluminat compounds in their composition in water, in humid and dry air. This is especially important for dry building mixtures, as they are applied to the concrete surface in a thin layer or used in restoration work. The loss of a significant portion of free water during hardening in dry air can lead to the decomposition of hydrated phases, a decrease in the strength of the cement stone and its adhesion to the surface of the restored object, and ultimately to a decrease in the durability of the applied layer of the mixture [8].

Ettringite is a highly sulfated form of calcium hydrosulfoaluminat and contains up to 32 water molecules ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$). This crystal hydrate belongs to the AFt phase, which is a solid solution or mixed crystals from $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ to $3\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ [9,10].

Ettringite is formed during the hydration of various inorganic binders, including the hydration and hardening of portland cements. In this case, a limited amount of this phase is formed, which regulates the setting time [3]. However, in some cements, excessive amounts of the resulting ettringite crystallize, which can cause expansion and even cracking of the hardened paste [2,6]. Very often, during corrosive action on concrete, crystallization of needle-shaped ettringite crystals can be observed in cracks [6,8].

Numerous studies devoted to the hydration of calcium aluminoferrites and the composition of newly formed hydrated phases have shown that the process is slower than the hydration process of calcium aluminates, but much more

процесс гидратации алюминатов кальция, но гораздо более сложно [11-14]. Мнения исследователей относительно гидравлической активности алюмоферритных фаз сводятся к тому, что гидратационная активность в ряду твердых растворов алюмоферритов кальция снижается с увеличением содержания Fe_2O_3 [5,11,13], а относительно продуктов гидратации алюмоферритов кальция в присутствии гипса, мнения весьма противоречивы [14].

Образование железозамещенного этtringита при гидратации сульфоалюмоферритов на основе C_4AF наблюдается в первые сутки гидратации. Причем в первые часы (1-12 часов) образуется моносulfатная форма гидросульфоалюмоферрита кальция. Гексагональные гидроалюмоферриты кальция состава $C_4(A_xF_{1-x})H_{13}$ наблюдаются в сутки и во все последующие сроки, а зародыши кубических гидроалюмоферритов $C_3(A_xF_{1-x})H_6$ образуются в 28 суток, при этом количество, образовавшегося в первые сутки гидроалюмоферрита состава $C_4(A_xF_{1-x})H_{13}$, остается неизменным [9,14].

Известно, что образование этtringита происходит с увеличением объема в 3 раза от первоначального. Это свойство было использовано для создания расширяющихся и напрягающих цементов, в основе которых лежало расширение цементного камня, основанное на образовании этtringита. В некоторых расширяющихся цементах образование этtringита используется для создания требуемых расширяющих напряжений [5,6,8,15,16].

Затвердевшая цементная паста постоянно претерпевает изменения под действием ряда факторов и в большей степени от действия влаги, что вызывает изменения в структуре и составе материалов, и может приводить к их разрушению, изменению внешнего вида. Поэтому актуальным является изучение влияния условий образования гидратных фаз в различных условиях и их устойчивость.

Особенно это относится к сухим строительным смесям, так как во многих сухих строительных смесях в составе вяжущего применяются расширяющиеся компоненты алюминатного и сульфоалюминатного твердения, при гидратации которых образуется этtringит, морфология которого существенно зависит от вида исходного клинкерного минерала, а также от условий образования [9,16,17].

Целью данного исследования было изучение кинетики образования этtringита из сульфоалюмината кальция и сульфоалюмоферрита кальция при различных условиях твердения, таких как вода, влажный и сухой воздух, а также установление количества образующегося этtringита и степени расширения образцов.

Материалы и методы исследований

В работе использовался сульфоалюминатный цемент минералогический состав, которого представлен, белитом (C_2S) – 37 %, сульфоалюминатом кальция ($C_4A_3\dot{S}$) – 56% и прочие составляющие 7 %. Химический состав цемента представлен в таблице 1.

В качестве исходных материалов в работе использовался сульфоалюмоферритный клинкер (САФК), выпущенный на Подольском цементном заводе. Химический состав и минералогический состав САФК клинкера представлен в табл. 2.

complex [11-14]. The opinions of researchers regarding the hydraulic activity of aluminoferrite phases boil down to the fact that the hydration activity in a series of solid solutions of calcium aluminoferrites decreases with an increase in the content of Fe_2O_3 [5,11,13], and regarding the hydration products of calcium aluminoferrites in the presence of gypsum, the opinions are very contradictory [14].

The formation of iron-substituted ettringite during the hydration of sulfoaluminoferrites based on C_4AF is observed in the first day of hydration. Moreover, in the first hours (1-12 hours) the monosulfate form of calcium hydrosulfoaluminoferrite is formed. Hexagonal calcium hydroaluminoferrites of the composition $C_4(A_xF_{1-x})H_{13}$ are observed in 24 hours and at all subsequent times, and the nuclei of cubic hydroaluminoferrites $C_3(A_xF_{1-x})H_6$ are formed in 28 days, while the amount of hydroaluminoferrites of the composition $C_4(A_xF_{1-x})H_{13}$ formed in the first day remains unchanged [9,14].

It is known that the formation of ettringite occurs with an increase in volume by 3 times from the original. This property was used to create expansive and stress-resistant cements, which were based on the expansion of cement stone, based on the formation of ettringite. In some expansive cements, the formation of ettringite is used to create the required expansive stresses [5,6,8,15,16].

Hardened cement paste is constantly subject to change under the influence of a number of factors, and to a greater extent, moisture, which causes changes in the structure and composition of materials and can lead to their destruction and changes in appearance. Therefore, it is relevant to study the influence of the conditions of formation of hydrate phases under various conditions and their stability.

This is especially true for dry building mixtures, since in many dry building mixtures, expanding components of aluminate and sulfoaluminate hardening are used in the binder composition, the hydration of which forms ettringite, the morphology of which significantly depends on the type of the original clinker mineral, as well as on the conditions of formation [9,16,17].

The aim of this study was to investigate the kinetics of ettringite formation from calcium sulfoaluminate and calcium sulfoaluminoferrite under different curing conditions such as water, humid and dry air, and to determine the amount of ettringite formed and the degree of expansion of the samples.

Materials and research methods

The work used sulfoaluminate cement, the mineralogical composition of which is represented by belite (C_2S) – 37%, calcium sulfoaluminate ($C_4A_3\dot{S}$) – 56% and other components – 7%. The chemical composition of the cement is presented in Table 1.

The starting materials used in the work were sulfoaluminoferrite clinker (SAFC) produced at the Podolsk cement plant. The chemical composition and mineralogical composition of SAFC clinker are presented in Table 2.

ТАБЛИЦА 1 ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СУЛЬФОАЛЮМИНАТНОГО ЦЕМЕНТА
Table 1 Chemical composition of sulfoaluminate cement

Материал Material	Содержание оксидов, % Oxide content, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	ппп
Сульфоалюминатный цемент Sulfoaluminate cement	12,77	14,73	3,20	51,45	1,76	10,45	1,14	2,70
ппп – потери при прокаливании ignition losses								

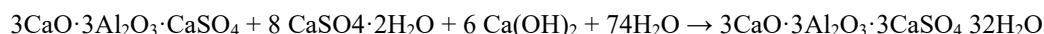
ТАБЛИЦА 2 ХИМИЧЕСКИЙ И МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ САФК КЛИНКЕРА
Table 2 Chemical and mineralogical composition of SAFC clinker

Содержание оксидов, масс.% Oxide content, wt. %		Содержание минералов, % Mineral content, %	
SiO ₂	14,76	Сульфоалюмоферритная фаза Sulfoaluminoferrite phase	55-60
Al ₂ O ₃	10,87		
Fe ₂ O ₃	13,78	Алит Alit	10-15
CaO	56,39		
MgO	2,04	Белит Belit	25-30
SO ₃	2,39		
R ₂ O	1,09		
ппп	0,51		

Цемент на основе сульфоалюмоферритного клинкера и гипса в количестве 10 масс.% получали совместным помолом до удельной поверхности 350 м²/кг.

Цементная паста из сульфоалюминатного или сульфоалюмоферритного цемента готовилась при водоцементном отношении 0,40. Из цементной пасты формовали образцы для испытаний размером 10 x 10x 30 мм. После схватывания и извлечения из формы они хранились до испытаний при температуре 20 °С в сухом воздухе в эксикаторе над силикагелем, в воздухе, насыщенном водяным паром, и в воде, насыщенной известью.

При твердении образцов в процессе гидратации протекала следующая химическая реакция:



Изменение геометрических размеров и массы образцов определялись после различного времени гидратации или до тех пор, пока они не распались из-за чрезмерного расширения. Гидратацию образцов останавливали, выдерживая образцы в ацетоне, после чего сушили на воздухе. Количество образовавшегося этtringита определяли методом дифференциального термического анализа (ДТА).

Результаты и обсуждение

Данные о расширении (средние значения трех образцов для испытаний) для паст, изготовленных с использованием C₄A₃S̄ представлены на рис. 1.

Сравнение результатов, полученных на испытательных образцах, которые твердели в воде, показывает большие различия как в отношении кинетики процесса расширения, так и общего расширения. Образцы очень быстро расширились и распались менее чем за 1 месяц из-за чрезмерного расширения. Образцы, твердевшие во влажном воздухе, расширяются так же, как твердеющие в воде, но медленнее. Все образцы для испытаний распались менее чем за 1 год из-за чрезмерного расширения.

Образцы, твердевшие в сухом воздухе, показали отчетливое, хотя и меньшее расширение.

Cement based on sulfoaluminoferrite clinker and gypsum in an amount of 10% by weight was obtained by joint grinding to a specific surface area of 350 м²/kg.

Cement paste from sulfoaluminate or sulfoaluminoferrite cement was prepared with a water-cement ratio of 0.40. Testing samples measuring 10 x 10 x 30 mm were formed from cement paste. After setting and removal from the mould, they were stored until testing at a temperature of 20 °C in dry air in a desiccator over silica gel, in air saturated with water vapour, and in water saturated with lime.

During the hardening of the samples during the hydration process, the following chemical reaction took place:

The changes in geometric dimensions and mass of the samples were determined after different hydration times or until they disintegrated due to excessive expansion. Hydration of the samples was stopped by soaking them in acetone and then air-drying. The amount of ettringite formed was determined by differential thermal analysis (DTA).

Results and discussion

Expansion data (average values of three testing samples) for pastes made using C₄A₃S̄ are shown in Fig. 1.

Comparison of the results obtained on testing samples that were cured in water shows large differences both in terms of the kinetics of the expansion process and the overall expansion. The samples expanded very rapidly and disintegrated in less than 1 month due to overexpansion.

The samples hardened in moist air expand in the same way as those hardened in water, but more slowly. All testing samples fell to pieces in less than 1 year due to excessive expansion.

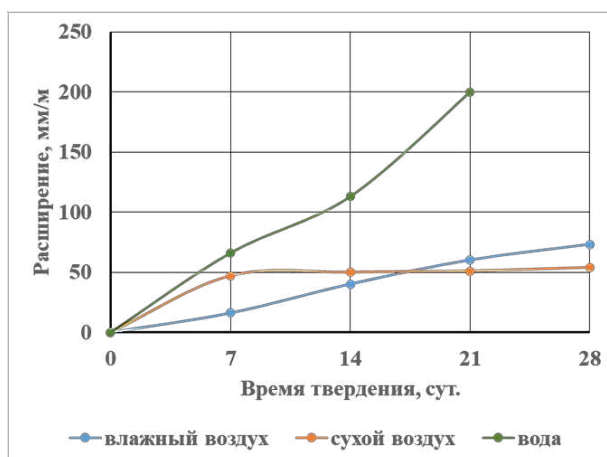
Samples cured in dry air showed a distinct, albeit smaller, expansion.

РИСУНОК 1

**РАСШИРЕНИЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ $C_4A_3\dot{S}$,
твёрдевших в воде, во влажном и сухом воздухе**

Figure 1

Expansion of water-cured $C_4A_3\dot{S}$ samples in humid and dry air



Степень расширения образцов из сульфоалюмоферрита кальция представлены на рис.2.

Как видно из представленных данных образцы расширялись медленно, и заметное трещинообразование стало очевидным только через 12 месяцев.

The degree of expansion of calcium sulfoaluminoferrite samples is shown in Fig. 2.

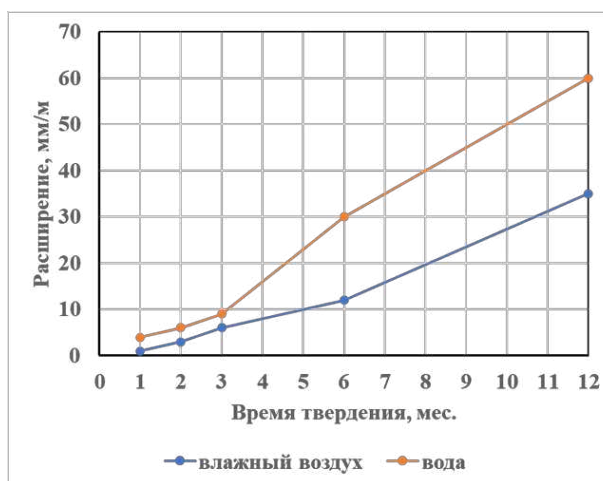
As seen from the presented data, the samples expanded slowly, and noticeable cracking became evident only after 12 months.

РИСУНОК 2

**КИНЕТИКА РАСШИРЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ
СУЛЬФОАЛЮМОФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ**

Figure 2

Kinetics of expansion of calcium sulfoaluminoferrite samples



Изучение кинетики образования этtringита в исследованных образцах из сульфоалюмината кальция, твердевших в условиях влажного воздуха и воды показало, что этtringит образуется очень быстро в течении первых 7 суток. В следующие 14 сут вплоть до 21 сут образование этtringита продолжается, однако не так интенсивно и к 28 суткам его образование стабилизируется (рис.3).

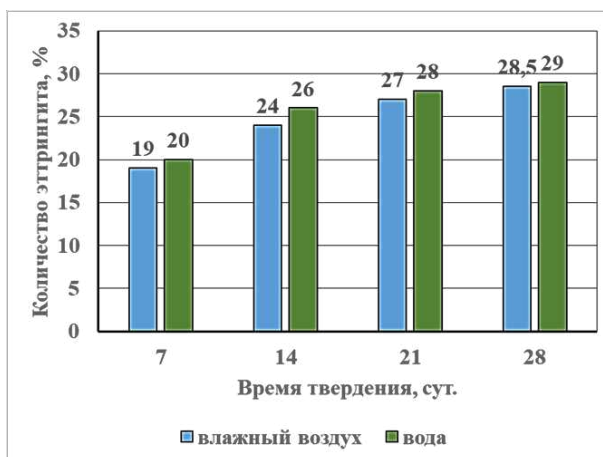
A study of the kinetics of ettringite formation in the studied calcium sulfoaluminate samples, hardened in conditions of humid air and water, showed that ettringite forms very quickly during the first 7 days. In the next 14 days up to the 21st day, the formation of ettringite continues, but not as intensively, and by the 28th day its formation stabilizes (Fig. 3).

РИСУНОК 3

**КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ ЭТТРИНГИТА В
ОБРАЗЦАХ ИЗ $C_4A_3\dot{S}$, твёрдевших в воде и во
влажном воздухе**

Figure 3

Kinetics of ettringite formation in $C_4A_3\dot{S}$ samples hardened in water and moisture air



Сравнение расширения образцов, происходящих во влажном воздухе и в воде, показало, что при одинаковых уровнях этtringита расширение было больше у образцов, твердевших в воде (рис.4). Можно заключить, что повышенное водопоглощение в этих условиях стимулирует расширение затвердевшей пасты. Поскольку расширение в обоих условиях сопровождалось поглощением воды из окружающей среды, представляется вероятным, что в процессе расширения происходили явления набухания.

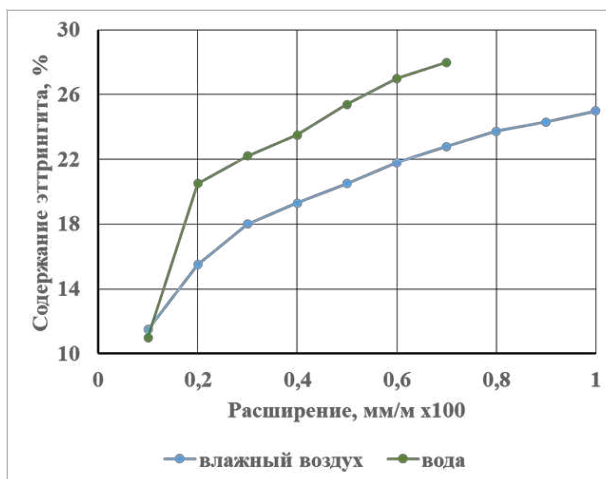
A comparison of the expansion of samples occurring in humid air and in water showed that, at the same levels of ettringite, the expansion was greater in samples hardened in water (Fig. 4). It can be concluded that increased water absorption under these conditions stimulates the expansion of the hardened paste. Since the expansion in both conditions was accompanied by the absorption of water from the surrounding medium, it seems likely that swelling phenomena occurred during the expansion process.

РИСУНОК 4

РАСШИРЕНИЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА ОБРАЗОВАВШЕГОСЯ ЭТТРИНГИТА В ОБРАЗЦАХ ИЗ $C_4A_3\bar{S}$, ТВЕРДЕВШИХ В ВОДЕ И ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Figure 4

Expansion as a function of ettringite formation in $C_4A_3\bar{S}$ samples hardened in water and moisture air



На рис.5 показана кинетика образования этtringита в исследованных образцах из сульфалоумоферрита кальция в условиях твердения во влажном воздухе и воде. Реакция образования этtringита заметно медленнее, чем при гидратации сульфалоумината кальция.

Figure 5 shows the kinetics of ettringite formation in the studied calcium sulfoaluminoferrite samples under hardening conditions in humid air and water. The reaction of ettringite formation is noticeably slower than during the hydration of calcium sulfoaluminate.

Изучение расширения исследуемых паст из сульфалоумоферрита кальция в зависимости от количества образовавшегося этtringита показало, что способность этtringита вызывать расширение для получения заданной степени расширения в пастах, твердеющих в воде и на влажном воздухе требуется разные количества этtringита. Пониженное расширение паст объясняется медленным образованием этtringита при твердении сульфалоумоферрита кальция (рис.6).

A study of the expansion of the investigated pastes made of calcium sulfoaluminoferrite depending on the amount of ettringite formed showed that the ability of ettringite to cause expansion to obtain a given degree of expansion in pastes hardening in water and in humid air requires different amounts of ettringite. The reduced expansion of the pastes is explained by the slow formation of ettringite during the hardening of calcium sulfoaluminoferrite (Fig. 6).

РИСУНОК 5

КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ ЭТТРИНГИТА ПРИ ГИДРАТАЦИИ СУЛЬФОАЛУМОФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ

Figure 5

Kinetics of ettringite formation during hydration of calcium sulfoaluminoferrite

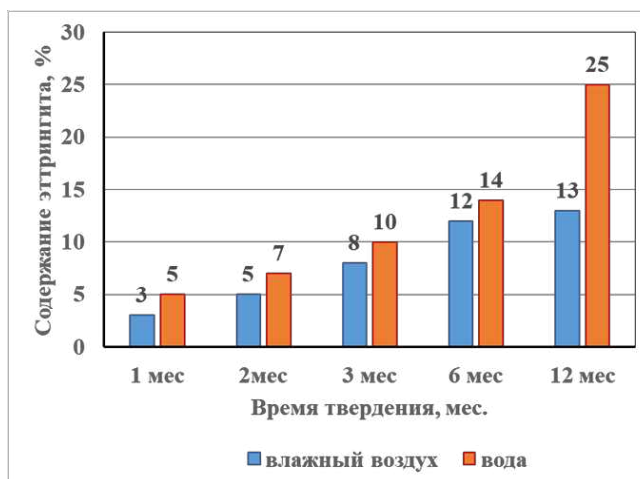
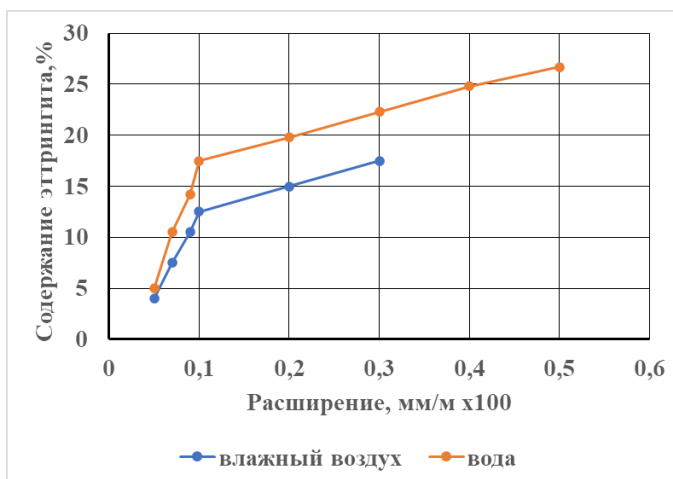


РИСУНОК 6

РАСШИРЕНИЕ ОБРАЗЦОВ СУЛЬФО-АЛЮМОФЕРРИТА КАЛЬЦИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОЛИЧЕСТВА ОБРАЗОВАВШЕГОСЯ ЭТТРИНГИТА, твердевших в воде и во влажном воздухе

Figure 6

Expansion of calcium sulfoalumoferrite samples depending on the amount of ettringite formed, hardened in water and in humid air



Заклучение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Установлено, что степень расширения, связанного с этtringитом, зависит от условий твердения образцов. Показано, что образцы, затвердевающие под водой гидратируются быстрее, чем образцы, затвердевающие на влажном воздухе. При этом разница в количестве образовавшегося этtringита не слишком велика.

2. Процесс гидратации в испытательных образцах, твердевших в сухом воздухе, практически остановился в течение нескольких дней. Это обусловлено потерей значительной части свободной воды в этих условиях.

3. Изучение образования этtringита в образцах из сульфoалюмината кальция, твердевших в условиях влажного воздуха и воды показало, что этtringит образуется очень быстро в течении первых 7 суток. В следующие 14 сут вплоть до 21 сут образование этtringита продолжается, однако не так интенсивно и к 28 суткам его образование стабилизируется.

4. Этtringит при гидратации сульфoалюмоферрита кальция образуется медленнее и в меньшем количестве, что обуславливает небольшое расширение образцов.

5. Сравнение расширения образцов как из сульфoалюмината кальция, так и из сульфoалюмоферрита кальция, происходящего во влажном воздухе и в воде, показало, что при одинаковых количествах этtringита расширение больше у образцов, твердевших в воде, что обусловлено повышенным водопоглощением в этих условиях.

Литература:

1. Кривобородов, Ю. Р. Физико-химические свойства сульфатированных клинкеров: Аналитический обзор / Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – Москва: ВНИИЭСМ, 1991. – 55 с. – (Цементная промышленность; Выпуск 2). – EDN TSRXOD.
 2. Кузнецова, Т. В. Химия, состав и свойства специальных цементов / Т. В. Кузнецова, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко // Химия и химическая технология на рубеже тысячелетий : материалы научно-практической конференции, Томск, 03–04 октября 2000 года / Томский политехнический университет (ТПУ). Том 1. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2000. – С. 96–98. – EDN TOEXOZ.
 3. Гусев, Б. В. Технология портландцемента и его

Conclusion

As a result of the research conducted, the following conclusions can be drawn:

1. It was found that the degree of expansion associated with ettringite depends on the curing conditions of the samples. It has been shown that samples hardening under water hydrate faster than samples hardening in humid air. However, the difference in the amount of ettringite formed is not too great.

2. The hydration process in test samples cured in dry air practically stopped within a few days. This is due to the loss of a significant portion of free water under these conditions.

3. A study of the formation of ettringite in calcium sulfoaluminate samples hardened in humid air and water showed that ettringite forms very quickly within the first 7 days. In the next 14 days up to the 21st day, the formation of ettringite continues, but not as intensively, and by the 28th day its formation stabilizes.

4. During the hydration of calcium sulfoaluminoferrite, ettringite is formed more slowly and in smaller quantities, which causes a slight expansion of the samples.

5. A comparison of the expansion of both calcium sulfoaluminate and calcium sulfoaluminoferrite samples in humid air and in water showed that, with the same amounts of ettringite, the expansion was greater in samples hardened in water, which was due to increased water absorption under these conditions.

References

1 Krivoborodov, Yu. R. Physicochemical Properties of Sulfated Clinkers: Analytical Review / Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. - Moscow: VNIIESM, 1991. - 55 p. - (Cement Industry; Issue 2). - EDN TSRXOD.
 2. Kuznetsova, T. V. Chemistry, composition and properties of special cements / T. V. Kuznetsova, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko // Chemistry and chemical technology at the turn of the millennium: materials of the scientific and practical conference, Tomsk, October 3–4, 2000 / Tomsk Polytechnic University (TPU). Vol. 1. – Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2000. – P. 96–98. – EDN TOEXOZ.
 3. Gusev, B. V. Technology of Portland cement and its varieties: Textbook / B. V. Gusev, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. - Moscow: Moscow State University of Civil

- разновидностей: Учебное пособие / Б. В. Гусев, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – Москва: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, 2016. – 113 с. – ISBN 978-5-7264-1230-6. – EDN XMA YRX.
4. Samchenko, S. V. Minerals of expansive and non-shrinkage sulfomineral cements / S. V. Samchenko, D. A. Zorin, Y. R. Krivoborodov // MATEC Web of Conferences, Saint-Petersburg, 15–17 ноября 2016 года. Vol. 106. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2017. – P. 03006. – <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710603006> . – EDN XMQTMT.
5. Самченко, С. В. Сульфатированные алюмоферриты кальция и цементы на их основе / С. В. Самченко; Федер. агентство по образованию, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Изд. центр. – Москва: Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева, 2004. – 120 с. – EDN QNDUNJ.
6. Кузнецова, Т. В. Алюминатные и сульфоалюминатные цементы / Т. В. Кузнецова. – Москва: Стройиздат, 1986. – 208 с. – EDN YRNAYL.
7. Мин, Х. Х. Кинетика минералообразования при синтезе сульфоалюминатного клинкера / Х. Х. Мин, Е. Н. Потапова, И. Ю. Бурлов // Успехи в химии и химической технологии. – 2022. – Т. 36, № 3(252). – С. 106-108. – EDN LUWMCW.
8. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня / С. В. Самченко. – 2-е издание. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – 288 с. – ISBN 978-5-7264-2808-6. – EDN KCBIBU.
9. Самченко, С. В. Роль этtringита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов / С. В. Самченко; Федер. агентство по образованию, РХТУ им. Д. И. Менделеева, Издат. центр. – Москва: Рос. хим.-технол. ун-т им. Д. И. Менделеева, 2005. – 154 с. – ISBN 5-7237-0514-0. – EDN QNDVZV.
10. Анализ структурно-фазового состояния моноалюмината кальция / Ю. А. Абзаев, Ю. С. Саркисов, Т. В. Кузнецова [и др.] // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 3(47). – С. 56-62. – <https://doi.org/10.5862/MCE.47.6> . – EDN SBZAHX.
11. Шпынова Л.Г., Саницкий М.А. Гидратационная активность ферритов и алюмоферритов кальция. // Укр.хим.ж.-1983.-49.-11. С.1138-1142.
12. Scrivener Karen L., Pratt P.L. Microstructure studies of the hydration of C3A and C4AF independently and in Cement paste // Proc. Brit. Ceram. Soc. -1984, - №35, - p.207-219.
13. Masauoshi A., Kiyoshi A., Masaki D., Minoru P., Akira D. Hydration products from calcium aluminoferrite Solid solution // Review 37 Gen. Meet. Cem. Assoc. Jap. Tech. Sess. - 1983, p.37-39.
14. Samchenko, S. V. Features of the formation of crystalline hydrosulfoaluminates during hydration of stoichiometric mixtures of calcium aluminates with calcium sulfate / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 393. – P. 132102. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132102> . – EDN CRATKC.
15. Ogawa K., Roy D. M. C4A3S hydration ettringite formation, and its expansion mechanism: I. expansion; Ettringite stability //Cement and Concrete Research. – 1981. – Т. 11. – №. 5-6. – С. 741-750.
16. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // Cement, Wapno, Beton. – 2008. – No. 5. – P. 254-257. – EDN RYAPJJ.
17. Samchenko, S. The influence of the different factors on the Engineering, IP R Media, 2016. - 113 p. - ISBN 978-5-7264-1230-6. - EDN XMA YRX.
4. Samchenko, S. V. Minerals of expansive and non-shrinkage sulfomineral cements / S. V. Samchenko, D. A. Zorin, Y. R. Krivoborodov // MATEC Web of Conferences, Saint-Petersburg, 15–17 ноября 2016 года. Vol. 106. – Saint-Petersburg: EDP Sciences, 2017. – P. 03006. – <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710603006> . – EDN XMQTMT.
5. Samchenko, S. V. Sulphated calcium aluminoferrites and cements based on them / S. V. Samchenko; Federal Education Agency, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Publishing Center. – Moscow: D. I. Mendeleev Russian Chemical-Technological University, 2004. – 120 p. – EDN QNDUNJ.
6. Kuznetsova, T.V. Aluminate and sulfoaluminate cements / T.V. Kuznetsova. – Moscow: Stroyizdat, 1986. – 208 p. – EDN YRNAYL.
7. Min, H. H. Kinetics of mineral formation during the synthesis of sulfoaluminate clinker / H. H. Min, E. N. Potapova, I. Yu. Burlov // Advances in Chemistry and Chemical Technology. - 2022. - Vol. 36, No. 3 (252). - P. 106-108. - EDN LUWMCW.
8. Samchenko, S. V. Formation and genesis of the structure of cement stone / S. V. Samchenko. - 2nd edition. - Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2020. - 288 p. - ISBN 978-5-7264-2808-6. - EDN KCBIBU.
9. Samchenko, S. V. The role of ettringite in the formation and genesis of the structure of special cements stone / S. V. Samchenko; Samchenko S. V.; Federal Education Agency, D. I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Publishing Center. – Moscow: D. I. Mendeleev Russian Chemical-Technological University, 2005. – 154 p. – ISBN 5-7237-0514-0. – EDN QNDVZV.
10. Analysis of the structural and phase state of calcium monoaluminum / Yu. A. Abzaev, Yu. S. Sarkisov, T. V. Kuznetsova [et al.] // Journal of Civil Engineering. - 2014. - No. 3 (47). - P. 56-62. - <https://doi.org/10.5862/MCE.47.6> - EDN SBZAHX.
11. Shpynova L.G., Sanitsky M.A. Hydration activity of calcium ferrites and aluminoferrites. // Ukr.khim.zh.-1983.-49.-11. P.1138-1142.
12. Scrivener Karen L., Pratt P.L. Microstructure studies of the hydration of C3A and C4AF independently and in Cement paste // Proc. Brit. Ceram. Soc. -1984, - №35, - p.207-219.
13. Masauoshi A., Kiyoshi A., Masaki D., Minoru P., Akira D. Hydration products from calcium aluminoferrite Solid solution // Review 37 Gen. Meet. Cem. Assoc. Jap. Tech. Sess. - 1983, p.37-39.
14. Samchenko, S. V. Features of the formation of crystalline hydrosulfoaluminates during hydration of stoichiometric mixtures of calcium aluminates with calcium sulfate / S. V. Samchenko, A. V. Korshunov // Construction and Building Materials. – 2023. – Vol. 393. – P. 132102. – <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132102> . – EDN CRATKC.
15. Ogawa K., Roy D. M. C4A3S hydration ettringite formation, and its expansion mechanism: I. expansion; Ettringite stability //Cement and Concrete Research. – 1981. – Т. 11. – №. 5-6. – С. 741-750.
16. Samchenko, S. V. Influence of fineness of expansive components on cement properties / S. V. Samchenko, D. A. Zorin // Cement, Wapno, Beton. – 2008. – No. 5. – P. 254-257. – EDN RYAPJJ.
17. Samchenko, S. The influence of the different factors on the stability of the AFt and AFm phases / S. Samchenko, E. Makarov // American Concrete Institute, ACI Special Publication, Moscow, 06–07 июня 2018 года. Vol. 326. – Moscow:

stability of the AFt and AFm phases / S. Samchenko, E. Makarov // American Concrete Institute, ACI Special Publication, Moscow, 06–07 июня 2018 года. Vol. 326. – Moscow: American Concrete Institute, 2018. – EDN BTXJRG.

Работа выполнена в НИУ МГСУ в рамках реализации Программы развития университета «ПРИОРИТЕТ 2030». Проект 3.1 «Научный прорыв в строительной отрасли – новые технологии, новые материалы, новые методы».
The work was carried out at NIU MSCU within the framework of the University Development Program “PRIORITY 2030”. Project 3.1 “Scientific breakthrough in the construction industry - new technologies, new materials, new methods”

Трунтов Никита Сергеевич – студент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», E-mail: n_truntov@mail.ru

Шушкин Фотий Борисович – студент кафедры строительного материаловедения ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», E-mail: robin.dreik@yandex.ru

Самченко Светлана Васильевна – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой строительного материаловедения, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», E-mail: SamchenkoSV@mgsu.ru (автор для связи)

Вклад авторов: Трунтов Н.С., Шушкин Ф.Б. – проведение экспериментов, обработка материала, написание статьи, Самченко С.В. – идея, научное руководство, редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Truntov Nikita Sergeevich – student of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: n_truntov@mail.ru

Shukshin Fotiy Borisovich – student of the Department of Construction Materials Science of the National Research Moscow State University of Civil Engineering, E-mail: robin.dreik@yandex.ru

Samchenko Svetlana Vasilievna – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Construction Materials Science, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research Moscow State University of Civil Engineering”, E-mail: SamchenkoSV@mgsu.ru (contact author)

Contribution of the author: Truntov N.S., Shukshin F.B. – conducting experiments, processing material, writing the article, Samchenko S.V. – idea, scientific supervision, editing the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.