

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.00

Научная специальность ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN TQUCLB

DOI 10.62980/2076-0655-2026-68-80

УСАДОЧНОЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В БЕТОНЕ: МЕХАНИЗМЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ЭФФЕКТИВНЫЕ СПОСОБЫ МИНИМИЗАЦИИ

Самченко С.В.¹, Ларсен О.А.¹, Тоболев П.Д.¹

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

АННОТАЦИЯ

Введение. Объемные изменения, вызванные усадкой, приводят к образованию трещин в бетоне. От свойств бетона проявлять усадочные деформации в значительной степени зависит его прочность особенно при растяжении. Компенсированные усадочные деформации повышают сопротивляемость образованию трещин. Это обуславливает также повышенную стойкость в различных средах.

Целью данной работы являлось разработать эффективные способы минимизации усадочного трещинообразования в бетоне за счет создания безусадочной структуры и управления процессами формирования структурного каркаса в начальный период гидратации и твердения цемента.

Материалы и методы. При проведении исследований использовали портландцемент СЕМ I-42,5, и композиционное вяжущее с сульфоалюмоферритным цементом (КВ). Аутогенную усадку исследовали на образцах-призмах размером 40×40×160 мм при твердении в условиях, исключающих испарение влаги из бетона. Суммарная деформация усадки, $\epsilon \times 10^{-6}$ определяли суммированием аутогенной и влажностной усадки. Деформацию образцов определяли согласно ГОСТ18833. Электронную микроскопию использовали для оценки структуры затвердевшей цементной пасты. Рентгенофазовый анализ использовали для определения фазового состава затвердевшей цементной пасты. Идентификацию минералов осуществляли по данным картотеки ICDD (Международная база данных порошковых рентгеновских дифрактограмм).

Результаты. Рассмотрены типы и механизмы возникновения усадочных деформаций цементного бетона и наиболее эффективные способы борьбы с усадочным трещинообразованием. Описана компенсация усадки путем применения расширяющих добавок, как одной из эффективных мер. Определена кинетика и периоды структурообразования в пластичной цементной пасте в бездобавочном портландцементе и композиционном вяжущем. Экспериментальными исследованиями показано, что суммарная деформация усадки образцов из портландцемента в возрасте 90 сут. достигает 515×10^{-6} , при этом на деформации аутогенной усадки приходится 60 % (309×10^{-6}). Суммарная деформация усадки образцов КВ достигает 410×10^{-6} , доля деформаций аутогенной усадки составляет 22 %.

Выводы. Эффективный способ минимизации усадочного трещинообразования в бетоне может достигаться за счет создания безусадочной структуры, образованной прочным кристаллическим самоподдерживающим каркасом из новообразований кристаллогидратов в твердеющей цементной пасте композиционного вяжущего, состоящего из портландцемента и сульфоалюмоферритного цемента. Применение композиционного вяжущего в составе бетона может обеспечивать получение мало дефектных, надежных и долговечных строительных конструкций из бетона и железобетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: усадка, аутогенная, влажностная, химическая, контракция, затвердевшая цементная паста, трещинообразование, внутренний уход, расширяющиеся добавки, этtringит, структура.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Самченко С.В., Ларсен О.А., Тоболев П.Д. Усадочное трещинообразование в бетоне: механизмы возникновения и эффективные способы минимизации // Техника и технология силикатов. – 2026. – Т. 33, № 1. – С. 68-80. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-68-80> . EDN: TQUCLB

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».

Поступила в редакцию: 26.01.2026 г

Одобрена к публикации: 24.02. 2026 г.

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN TQUCLB

DOI 10.62980/2076-0655-2026-68-80

SHRINKAGE CRACKING IN CONCRETE: MECHANISMS OF OCCURRENCE AND EFFECTIVE WAYS OF MINIMIZATION

Samchenko S.V.¹, Larsen O.A.¹, Tobolev P.D.¹

¹ National Research Moscow State University of Civil Engineering

ABSTRACT

Introduction: Volumetric changes caused by shrinkage lead to cracking in concrete. The strength of concrete, especially in tension, largely depends on its ability to exhibit shrinkage deformations. Compensated shrinkage deformations increase resistance to crack formation. This also results in increased resistance in various environments.

The aim of this work was to develop effective methods to minimize shrinkage cracking in concrete. This is achieved by creating a shrinkage-free structure and controlling the processes of formation of the structural framework during the initial period of hydration and hardening of the cement.

Materials and methods. During the research, Portland cement CEM I-42.5 and a composite binder with sulfoaluminoferrite cement (CB) were used. Autogenous shrinkage was studied on prism samples measuring 40×40×160 mm during hardening under conditions that prevent moisture evaporation from the concrete. The total shrinkage deformation, $\epsilon \times 10^{-6}$, was determined by summing the autogenous and moisture shrinkage. The deformation of the samples was determined according to GOST 18833. Electron microscopy was used to evaluate the structure of the hardened cement paste. X-ray diffraction analysis was used to determine the phase composition of the hardened cement paste. Identification of minerals was carried out using data from the ICDD (International Centre for Diffraction Data) database.

Results. The types and mechanisms of shrinkage deformation in cement concrete and the most effective methods for combating shrinkage cracking are examined. Shrinkage compensation by using expanding additives is described as one of the effective measures. The kinetics and periods of structure formation in plastic cement paste in non-additive Portland cement and composite binder were determined. Experimental studies have shown that the total shrinkage deformation of Portland cement samples at the age of 90 days reaches 515×10^{-6} . The autogenous shrinkage deformation is 60% (309×10^{-6}). The total shrinkage deformation of the CB samples is 410×10^{-6} , the share of autogenous shrinkage deformations is 22%.

Conclusions. Effective method for minimizing shrinkage cracking in concrete can be achieved by creating a shrinkage-free structure. This structure is formed by a strong crystalline framework of newly formed crystal hydrates during the hardening of sulfoaluminoferrite cement. The use of composite binders in concrete can ensure the production of low-defect, reliable and durable building structures made of concrete and reinforced concrete.

KEY WORDS: shrinkage, autogenous, moisture, chemical, contraction, hardened cement paste, crack formation, internal care, expanding additives, ettringite, structure.

FOR CITATION: Samchenko S.V., Larsen O.A., Tobolev P.D. Shrinkage cracking in concrete: mechanisms of occurrence and effective ways of minimization // Engineering and Technology of Silicates. – 2026. Vol. 33, No1. – Pp. 68 – 80. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-68-80> . EDN: TQUCLB

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”

Received by the editors: January 26, 2026

Approved for publication: February 24, 2026

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных причин трещинообразования в бетоне является его объемные изменения, вызванные усадкой. От свойств бетона проявлять усадочные деформации в значительной степени зависит его прочность (особенно при растяжении) и сопротивляемость образованию трещин, а следовательно стойкость в различных средах. Наличие трещин в бетонных и железобетонных конструкциях снижает их долговечность вследствие попадания различных агрессивных веществ в эти трещины, что приводит к развитию деструкций структуры бетона и коррозии арматуры [1-4]. Ремонт и восстановление бетона сопряжены с высокими капитальными затратами и повышенной трудоемкостью. Наиболее экономичными являются мероприятия по предотвращению или минимизации трещинообразования в бетоне.

В современном бетоноведении выделяют пять основных видов усадки бетона: пластическую, аутогенную, влажностную, термическую и карбонизационную. Каждая из приведенных видов усадки обусловлена различными эффектами, что обуславливает сложность прогнозирования величины полной усадки [5-11].

Пластическая усадка может приводить к образованию трещин на поверхности бетона в конструкциях с большой открытой поверхностью. Как правило, она протекает в период начального структурообразования от начала до конца схватывания в свежееуложенном бетоне. Величина этой усадки зависит от температуры и относительной влажности окружающего воздуха, скорости ветра и температуры бетона [5,6,8,10].

В раннем возрасте, когда бетон характеризуется минимальной прочностью при растяжении и модулем упругости, чтобы выдерживать внутренние напряжения хорошо коррелируется уравнением (1). Как правило это период между 24 и 48 ч после схватывания, который является самым уязвимым, так как именно он может стать причиной образования трещин [12].

$$\sigma t = E(\varepsilon_s - \varepsilon_c) \geq f_t \quad (1)$$

где σt – напряжение растяжения,
 E – модуль упругости,
 $\varepsilon_s, \varepsilon_c$ – относительные деформации ползучести и усадки соответственно,
 f_t – предел прочности бетона при растяжении.

В этот период в бетонах за счет химического взаимодействия частиц цемента с водой протекают реакции гидролиза и гидратации с образованием кристаллогидратов этtringита и гидросиликатов кальция [13]. Объем продуктов гидратации в сравнении с объемом исходных зерен цемента значительно меньше, в результате чего очень быстро формируется сеть микрокапилляров, которые высасывают воду из крупных капилляров в процессе интенсивной гидратации цемента [14]. Этот период в технической литературе называют контракцией затвердевшего цементного теста (контракция Ле Шателье) или химической усадкой. Химическая усадка обуславливает формирование капиллярной пористости и, как следствие, появление менисков, имеющих большой радиус кривизны и создающих высокие сжимающие напряжения на стенки пор вследствие обезвоживания, что приводит к самовысушиванию и

INTRODUCTION

One of the main reasons for cracking in concrete is its volumetric changes caused by shrinkage. The strength of concrete (especially under tension) and resistance to cracking, and therefore its durability in various environments, largely depend on its ability to exhibit shrinkage deformations. The presence of cracks in concrete and reinforced concrete structures reduces their durability due to the penetration of various aggressive substances into these cracks, which leads to the development of destruction of the concrete structure and corrosion of the reinforcement [1-4]. Concrete repair and restoration are associated with high capital costs and increased labor intensity. The most cost-effective measures are those aimed at preventing or minimizing cracking in concrete.

In modern concrete science, five main types of concrete shrinkage are distinguished: plastic, autogenous, moisture, thermal and carbonation. Each of the given types of shrinkage is caused by different effects, which makes it difficult to predict the magnitude of total shrinkage [5-11].

Plastic shrinkage can lead to cracks in the concrete surface in structures with large exposed surfaces. As a rule, it occurs during the period of initial structure formation from the beginning to the end of setting in freshly laid concrete. The magnitude of this shrinkage depends on the temperature and relative humidity of the surrounding air, wind speed and the temperature of the concrete [5,6,8,10].

At an early age, when concrete is characterized by minimum tensile strength and elastic modulus to withstand internal stresses, it is well correlated by equation (1). As a rule, it is the period between 24 and 48 hours after setting that is the most vulnerable, since it is this period that can cause cracks to form [12].

where σt is the tensile stress,
 E is the modulus of elasticity,
 $\varepsilon_s, \varepsilon_c$ are the relative creep and shrinkage strains, respectively,
 f_t is the tensile strength of concrete.

During this period, due to the chemical interaction of cement particles with water, hydrolysis and hydration reactions occur in concrete, forming ettringite crystal hydrates and calcium hydrosilicates [13]. The volume of hydration products in comparison with the volume of the original cement grains is significantly smaller, as a result of which a network of microcapillaries is formed very quickly, which suck water out of large capillaries in the process of intensive hydration of the cement [14]. In technical literature, this period is called contraction of the hardened cement paste (Le Chatelier contraction) or chemical shrinkage. Chemical shrinkage causes the formation of capillary porosity and, as a consequence, the appearance of menisci with a large radius of curvature and creating high compressive stresses on the pore walls due to dehydration, which leads to self-drying and the

образованию пустых пор в материале, когда уже произошло схватывание. Эти процессы создают условия для развития аутогенной усадки, которые протекают в течение нескольких дней или недель.

Таким образом, аутогенная усадка – это макроскопическое внешнее уменьшение размеров цементных систем, которое имеет место в изотермических нестесненных замкнутых условиях, и она обычно вызывается химической усадкой. Обе эти усадки развиваются одновременно до того момента, когда в цементной пасте возникает самоподдерживающийся каркас из новообразований кристаллогидратов и система начинает вести себя, как твердое тело и аутогенная усадка становится заметно меньше химической.

Такая проблема более актуальна для высококачественных бетонов с низким значением $W/C = 0,3...0,4$, чем для обычных бетонов [11,12,15]. Высокопрочные бетоны, как правило, имеют большой расход цемента и пуццолановых добавок, а также содержат недостаточное количество воды затворения для того, чтобы обеспечить заполнение крупных капилляров, необходимых для поддержания реакций гидратации и пуццолановой реакции, поэтому даже при низком значении W/C склонны к высокой усадке [8,16].

Аутогенная усадка высококачественных бетонов, если ее не контролировать, может достигать больших значений деформаций в течение всего лишь 24 часов (до величины $\varepsilon = -250 \cdot 10^6$ и более), что приводит к раннему трещинообразованию, если усадка проявляется в стесненных условиях [15]. Обезвоживание пор отражается не только на возникновении усадки, но и на кинетике гидратации вяжущего, лимитируя ее степень [17]. При этом пуццолановые добавки, в частности высокоактивный микрокремнезем, увеличивают снижение относительной влажности и значения аутогенной усадки цементного камня на ранних стадиях гидратации, а менее активные – на поздних твердения [18-20].

Во избежание влажностной усадки необходимым условием роста прочности бетона является поддержание необходимой внутренней влажности. При полном насыщении цементного камня влагой гидратация цемента проходит более полно и продолжается длительное время, что улучшает эксплуатационные показатели бетона такие как водонепроницаемость, коррозионная стойкость и морозостойкость [6]. При надлежащем влажностном уходе в процессе гидратации цемента поры заполняются продуктами гидратации, снижается открытая пористость и проницаемость бетона [4].

В отличие от влажностной усадки аутогенную усадку невозможно уменьшить путем внешнего ухода за бетоном из-за ограниченного проникания влаги в плотную структуру бетона [6]. Согласно [21] количество воды, необходимое для достижения максимальной степени гидратации в бетоне оценивается из расчетов, основанных на химической усадке и максимальной степени гидратации, теоретически достижимой в нормальном цементном тесте.

Для снижения усадки при высыхании бетона широко используются химические добавки в сочетании с расширяющимся агентом. Как правило химические добавки представляют собой суперпластификатор на основе акрилатного полимера со встроенной в структуру молекулы с группой SRA (на основе полиэтиленгликоля), которая при повышении pH поровой жидкости в процессе гидратации цемента отщепляется от базовой молекулы, вызывая снижение поверхностного натяжения жидкости [22,23].

formation of empty pores in the material when setting has already occurred. These processes create conditions for the development of autogenous shrinkage, which occurs over several days or weeks.

Thus, autogenous shrinkage is a macroscopic external reduction in the dimensions of cementitious systems that occurs under isothermal, unconstrained confined conditions and is usually caused by chemical shrinkage. Both of these shrinkages develop simultaneously until the moment when a self-supporting framework of newly formed crystal hydrates appears in the cement paste and the system begins to behave like a solid body and the autogenous shrinkage becomes noticeably less than the chemical one.

This problem is more relevant for high-quality concretes with a low W/C value of $0.3...0.4$ than for ordinary concretes [11,12,15]. High-strength concretes, as a rule, have a high consumption of cement and pozzolanic additives, and also contain an insufficient amount of mixing water to ensure the filling of large capillaries necessary to maintain hydration reactions and the pozzolanic reaction, therefore, even with a low W/C value, they are prone to high shrinkage [8,16].

Autogenous shrinkage of high-quality concrete, if not controlled, can reach large deformation values within just 24 hours (up to $\varepsilon = -250 \cdot 10^6$ and more), which leads to early cracking if shrinkage occurs in confined conditions [15]. Dehydration of pores affects not only the occurrence of shrinkage, but also the kinetics of binder hydration, limiting its degree [17]. At the same time, pozzolanic additives, in particular highly active microsilica, increase the reduction in relative humidity and the value of autogenous shrinkage of cement stone in the early stages of hydration, and less active ones – in the late stages of hardening [18-20].

To avoid moisture shrinkage, maintaining the required internal humidity is a necessary condition for increasing the strength of concrete. When the cement stone is completely saturated with moisture, the hydration of cement occurs more completely and continues for a long time, which improves the performance characteristics of concrete such as water resistance, corrosion resistance and frost resistance [6]. With proper moisture treatment, during the cement hydration process, the pores are filled with hydration products, and the open porosity and permeability of concrete are reduced [4].

Unlike moisture shrinkage, autogenous shrinkage cannot be reduced by external curing of concrete due to the limited penetration of moisture into the dense structure of concrete [6]. According to [21], the amount of water required to achieve the maximum degree of hydration in concrete is estimated from calculations based on chemical shrinkage and the maximum degree of hydration theoretically achievable in normal cement paste.

To reduce shrinkage during drying of concrete, chemical additives in combination with an expanding agent are widely used. As a rule, chemical additives are a superplasticizer based on an acrylate polymer with a molecule with an SRA group (based on polyethylene glycol) built into the structure, which, when the pH of the pore liquid increases during the cement hydration process, splits off from the base molecule, causing a decrease in the surface tension of the liquid [22,23]. Such additives provide a significant reduction in free shrinkage, which leads to a

Подобные добавки дают значительное снижение свободной усадки, что приводит к снижению количества и протяженности трещин, особенно в сочетании с расширяющимся агентом, т. е. способствует созданию бетонов с компенсированной усадкой [24].

Компенсация усадки путем применения расширяющих добавок является одной из эффективных мер, так как базируется на расширении бетона при образовании этtringита. Среди расширяющихся добавок сульфоалюминатного твердения в настоящее время разработаны различные типы расширяющихся добавок как самостоятельных компонентов бетонных смесей [25]. Промышленностью выпускаются сульфоалюминатный и сульфоалюмоферритный цементы, которые широко используются для придания твердеющей цементной пасте в составе бетона расширение или безусадочность, а также способствуют повышению коррозионной стойкости цементных систем [17,26]. Придание коррозионной стойкости, как и величина расширения цементного камня регулируется дисперсностью расширяющегося компонента [28-30], которая позволяет получать безусадочный плотный цементный камень [31].

Необходимо отметить, что получить бетоны с компенсированной усадкой при использовании расширяющих агентов можно только в условиях водного твердения, поскольку для формирования этtringита необходимо большое количество воды [32]. Расширение в значительной мере зависит от влажностного ухода, по крайней мере семь суток после формирования.

Таким образом, для снижения трещинообразования за счет аутогенной и химической усадки необходимо разрабатывать способы управления этими процессами и создавать условия для образования прочного кристаллического самоподдерживающего каркаса из новообразований кристаллогидратов в твердеющей цементной пасте.

Целью данной работы являлось разработать эффективные способы минимизации усадочного трещинообразования в бетоне за счет создания безусадочной структуры и управления процессами формирования структурного каркаса в начальный период гидратации и твердения цемента.

Материалы и методы

При проведении исследований использовали портландцемент СЕМ I-42,5, сульфоалюмоферритный цемент с удельной поверхностью $S_{уд.} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Были исследованы два состава: на портландцементе (ПЦ) и композиционном вяжущем (КВ). Композиционное вяжущее готовили смешением портландцемента (93% ПЦ) и сульфоалюмоферритного цемента (7% САФК). В качестве контрольного был принят бездобавочный портландцемент.

Аутогенную усадку исследовали на образцах-призмах размером $40 \times 40 \times 160 \text{ мм}$ при твердении в условиях, исключающих испарение влаги из бетона. Для этого образцы были закрыты полиэтиленовой пленкой. Деформацию образцов определяли согласно ГОСТ18833-73¹, с помощью измерительных рычажно-зубчатых головок типа ИИГ с ценой деления 0,001 мм. Измерение деформаций аутогенной усадки осуществляли в течение 28 сут. В последующие сроки измеряли деформации усадки образцов, вызванные испарением из них влаги (влажностная усадка). При этом

reduction in the number and extent of cracks, especially in combination with an expanding agent, i.e., it contributes to the creation of concrete with compensated shrinkage [24].

Compensation for shrinkage by using expanding additives is one of the effective measures, as it is based on the expansion of concrete during the formation of ettringite. Among the expanding additives for sulfoaluminate hardening, various types of expanding additives have been developed as independent components of concrete mixtures [25]. The industry produces sulfoaluminate and sulfoaluminoferrite cements, which are widely used to impart expansion or shrinkage resistance to the hardening cement paste in concrete, and also contribute to increasing the corrosion resistance of cement systems [17,26]. The imparting of corrosion resistance, as well as the amount of expansion of the cement stone, is regulated by the dispersion of the expanding component [28-30], which makes it possible to obtain a compact, compact cement stone [31].

It should be noted that it is possible to obtain concrete with compensated shrinkage using expanding agents only under conditions of water hardening, since a large amount of water is required for the formation of ettringite [32]. Expansion is largely dependent on moisture treatment for at least seven days after molding.

Thus, in order to reduce crack formation due to autogenous and chemical shrinkage, it is necessary to develop methods for controlling these processes and create conditions for the formation of a strong crystalline self-supporting framework from newly formed crystal hydrates in the hardening cement paste.

The aim of this work was to develop effective methods for minimizing shrinkage cracking in concrete by creating a shrinkage-free structure and controlling the processes of formation of the structural framework during the initial period of hydration and hardening of cement.

Materials and methods

During the research, Portland cement CEM I-42.5, a sulfoaluminoferrite cement with a specific surface area of $S_{sp.} = 300 \text{ m}^2/\text{kg}$, was used.

Two compositions were studied: on Portland cement (PC) and composite binder (CB). The composite binder was prepared by mixing Portland cement (93% PC) and sulfoaluminoferrite cement (7% SAFK). Portland cement without additives was used as a control.

Autogenous shrinkage was studied on prism samples measuring $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ during hardening under conditions that exclude moisture evaporation from concrete. For this purpose, the samples were covered with polyethylene film. The deformation of the samples was determined according to GOST 18833-73, using measuring lever-toothed heads of type ИИГ with a division value of 0.001 mm. Measurement of autogenous shrinkage deformations was carried out over 28 days. In subsequent periods, the shrinkage deformations of the samples caused by the evaporation of moisture from them (moisture shrinkage) were measured. The samples were stored in a desiccator over calcium chloride powder. The total shrinkage

¹ ГОСТ18833-73 – Головки измерительные рычажно-зубчатые. Технические условия

¹ GOST18833-73 – Lever-gearing measuring heads. Specifications

образцы хранили в эксикаторе над порошком хлористого кальция. Суммарная деформация усадки, $\epsilon \times 10^{-6}$ определяли суммированием аутогенной и влажностной усадки.

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cd} + \epsilon_{ca} \quad (2)$$

где ϵ_{cs} – полная относительная деформация усадки;
 ϵ_{cd} – относительная деформация бетона, обусловленная высыханием (влажностная усадка);
 ϵ_{ca} – относительная деформация аутогенной усадки.

Начальное структурообразование определялось по результатам сроков схватывания исследуемых составов на тесте нормальной густоты. Сроки схватывания определялись по стандартной методике согласно ГОСТ 310.1-76² на приборе Вика.

Структуру затвердевшей цементной пасты оценивали визуально по данным электронной микроскопии.

Фазовый состав затвердевшей цементной пасты определяли с помощью рентгенофазового анализа с использованием дифрактометра с медным антикатодом (Cu anode $\lambda_{K\alpha 1} = 1,54056 \text{ \AA}$; 40 mA and 40 kV). Съемка рентгеновских спектров проводилась от 6 до 70° 2 θ с шагом 0,02° 2 θ . Идентификацию минералов осуществляли по данным картотеки ICDD (Международная база данных порошковых рентгеновских дифрактограмм).

Результаты и обсуждение

В пластичной цементной пасте аутогенная усадка обусловлено тем, что объем продуктов гидратации цемента меньше, чем объем цемента и воды до гидратации (химическая усадка). Интенсивное образование кристаллогидратов в этот период обуславливает начальное структурообразование и снижает эту усадку. Для определения начального структурообразования определялось потеря подвижности цементной пасты и сроки начала и окончания схватывания. Результаты определения представлены на рис. 1.

РИСУНОК 1

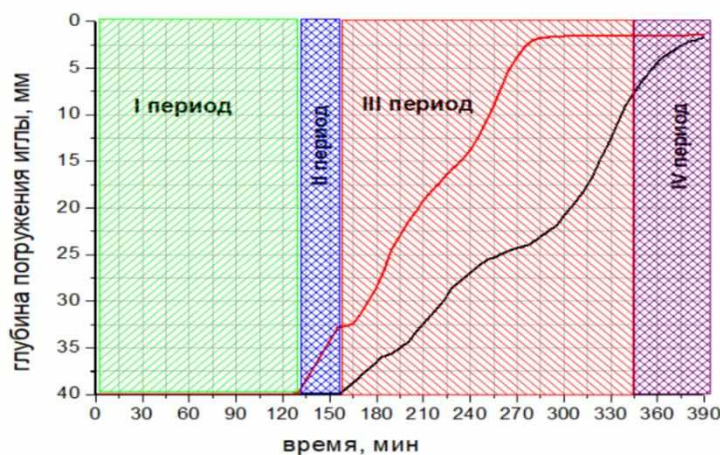
КИНЕТИКА И ПЕРИОДЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В ПЛАСТИЧНОЙ ЦЕМЕНТНОЙ ПАСТЕ

1 - бездобавочный портландцемент,
 2 - композиционное вяжущее (КВ)

Figure 1

Kinetics and periods of structure formation in plastic cement paste

1 - pure Portland cement,
 2 - composite binder (CB)



I – период химического взаимодействия цемента с водой,
 II – период зарождения и кристаллизации кристаллогидратов (начало схватывания),
 III - образование первичного кристаллического каркаса,
 IV - прогрессирующая потеря подвижности твердеющей композиции (конец схватывания)

deformation, $\epsilon \times 10^{-6}$, was determined by summing the autogenous and moisture shrinkage.

where ϵ_{cs} is the total relative shrinkage strain;
 ϵ_{cd} is the relative deformation of concrete due to drying (moisture shrinkage);
 ϵ_{ca} is the relative deformation due to autogenous shrinkage.

The initial structure formation was determined based on the results of the setting times of the studied compositions in a normal density test. The setting times were determined using the standard method in accordance with GOST 310.1-76² using a Vicat device.

The structure of the hardened cement paste was assessed visually using electron microscopy data.

The phase composition of the hardened cement paste was determined by X-ray phase analysis using a diffractometer with a copper anticathode (Cu anode $\lambda_{K\alpha 1} = 1.54056 \text{ \AA}$; 40 mA and 40 kV). X-ray spectra were recorded from 6 to 70° 2 θ with a step of 0.02° 2 θ . Mineral identification was carried out using the ICDD (International X-ray Powder Diffraction Database) data.

Results and discussion

In plastic cement paste, autogenous shrinkage is caused by the fact that the volume of cement hydration products is less than the volume of cement and water before hydration (chemical shrinkage). The intensive formation of crystal hydrates during this period causes the initial structure formation and reduces this shrinkage. To determine the initial structure formation, the loss of cement paste mobility and the onset and end of setting times were determined. The results are presented in Fig. 1.

² ГОСТ 310.1-76 – Цементы. Методы испытаний. Общие положения

² GOST 310.1-76 – Cements. Test methods. General

В I период химического взаимодействия цемента с водой, диполи воды образуют вокруг зерен минералов цемента двойной электрический слой. Происходит адсорбция молекул воды на поверхности частиц твердой фазы минералов, которая в последствии развивается в хемосорбцию.

В результате химического взаимодействия начинает развиваться II период зарождения и кристаллизации кристаллогидратов. При взаимодействии портландцемента с водой в первую очередь образуются кристаллогидраты алюминатов и высокоосновных гидросиликатов кальция. При взаимодействии сульфоалюмоферритного цемента с водой образуются как повышенное количество кристаллогидратов алюминатов, так и небольшое количество гидросиликатов кальция. Добавление этого цемента в состав композиционного вяжущего приводит к сдвигу второго периода в более раннюю область. Начало схватывания для композиционного вяжущего наступает на 20 – 30 минут раньше.

Кристаллогидраты, образующиеся в первые минуты и часы, прошедшие после затворения цемента водой, образуют первичный кристаллический каркас (III период), в пределах которого, еще сильно разреженного, кристаллизуются все остальные продукты гидратации вяжущего. Они постепенно заполняют свободное пространство между зернами и начинается формирование структуры цементного камня. Как видно из полученных данных (рис.1) формирование первичного каркаса в композиционном вяжущем протекает более интенсивно, чем в бездобавочном портландцементе, что приводит к ранней потере подвижности твердеющей пасты. Т.е., IV период структурообразования в пластичной цементной пасте, характеризующий конец схватывания наступает раньше на 60 минут.

Начальными кристаллогидратами при гидратации сульфоалюмоферритного цемента являются кристаллы этtringита и гидроалюминатов кальция (C_4AH_{13}), о чем свидетельствует рентгенофазовый анализ затвердевшей цементной пасты из композиционного вяжущего (рис.2 а). Эти кристаллогидраты совместно с кристаллогидратами, образующимися при гидратации портландцемента, формируют развитый трехмерный кристаллический каркас, который значительно снижает аутогенную усадку.

У портландцемента кристаллы гидроксида кальция и небольшое количество мелкодисперсных кристаллов этtringита формируют начальный кристаллический каркас. На рентгенограмме в начальный период гидратации фиксируются только эти кристаллогидраты (рис.2 б). Сформированный трехмерный каркас не способен выдержать высокие сжимающие напряжения на стенки межкристаллитных пор, что вызывает контракцию затвердевшего цементного теста, сопровождающейся химической усадкой.

Изучением аутогенной усадки образцов из портландцемента установлено, что она достаточно интенсивно начинает проявляться через 10 ч с момента формования образцов и к 30 часам твердения деформации аутогенной усадки достигают значений 135×10^{-6} . Для образцов из композиционного вяжущего в этот период твердения аутогенная усадка не фиксируется, а наблюдается развитие расширения твердеющей системы (рис.3).

In the first period of chemical interaction of cement with water, water dipoles form a double electric layer around the grains of cement minerals. Adsorption of water molecules on the surface of solid phase mineral particles occurs, which subsequently develops into chemisorption.

As a result of chemical interaction, the second period of nucleation and crystallization of crystal hydrates begins to develop. When Portland cement interacts with water, crystalline hydrates of aluminates and highly basic calcium hydrosilicates are formed first. When sulfoaluminoferrite cement interacts with water, both an increased amount of aluminate crystal hydrates and a small amount of calcium hydrosilicates are formed. The addition of this cement to the composition of the composite binder leads to a shift of the second period to an earlier region. The setting time for the composite binder begins 20–30 minutes earlier.

Crystal hydrates formed in the first minutes and hours after the cement has been mixed with water form the primary crystalline framework (period III), within which, while still highly rarefied, all other binder hydration products crystallize. They gradually fill the free space between the grains and the formation of the structure of the cement stone begins. As can be seen from the obtained data (Fig. 1), the formation of the primary framework in the composite binder occurs more intensively than in non-additive Portland cement, which leads to an early loss of mobility of the hardening paste. That is, the IV period of structure formation in plastic cement paste, which characterizes the end of setting, occurs 60 minutes earlier.

The initial crystal hydrates during the hydration of sulfoaluminoferrite cement are crystals of ettringite and calcium hydroaluminates (C_4AH_{13}), as evidenced by the X-ray phase analysis of the hardened cement paste from the composite binder (Fig. 2 a). These crystal hydrates, together with the crystal hydrates formed during the hydration of Portland cement, form a developed three-dimensional crystalline framework, which significantly reduces autogenous shrinkage.

In Portland cement, calcium hydroxide crystals and a small amount of finely dispersed ettringite crystals form the initial crystalline framework. In the radiograph during the initial period of hydration, only these crystal hydrates are recorded (Fig. 2 b). The formed three-dimensional framework is not able to withstand high compressive stresses on the walls of intercrystalline pores, which causes contraction of the hardened cement paste, accompanied by chemical shrinkage.

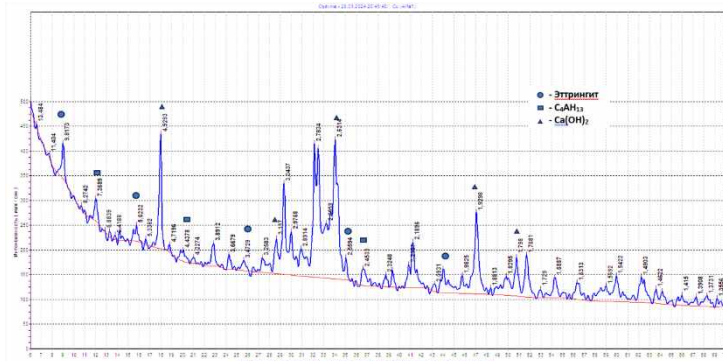
A study of the autogenous shrinkage of Portland cement samples showed that it begins to manifest itself quite intensively 10 hours after the samples were formed, and by 30 hours of hardening, the autogenous shrinkage deformations reach values of 135×10^{-6} . For samples made from composite binders, autogenous shrinkage is not recorded during this period of hardening, but the development of expansion of the hardening system is observed (Fig. 3).

РИСУНОК 2

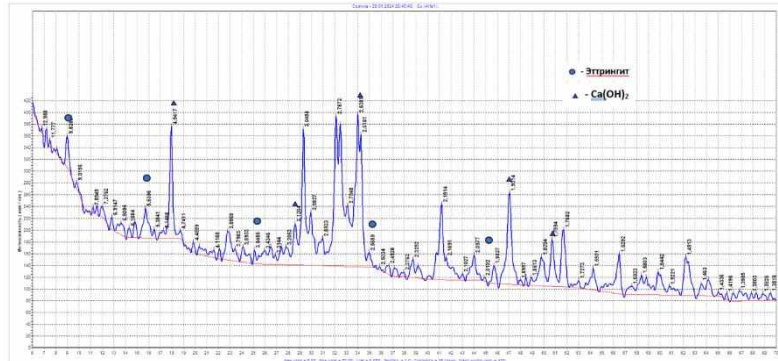
**РЕНТГЕНОГРАММЫ ЗАТВЕРДЕВШИХ
ЦЕМЕНТНЫХ ПАСТ в возрасте 2 сут.**
а – композиционное вяжущее (КВ);
б – бездобавочный портландцемент

Figure 2

**Diffraction patterns of hardened cement
pastes at the age of 2 days.**
a - composite binder (CB);
b - pure Portland cement



а (a)



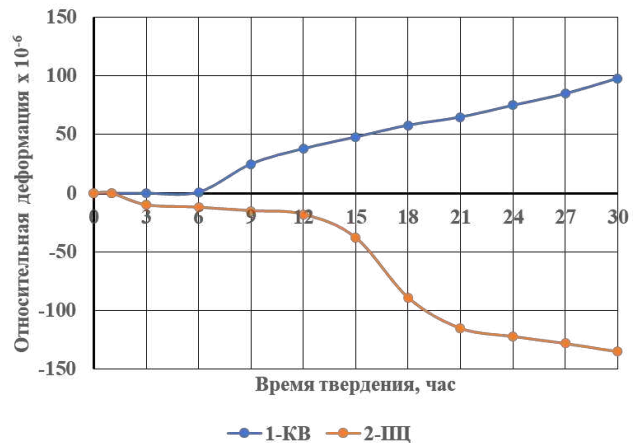
б (b)

РИСУНОК 3

**ИЗМЕНЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ
ДЕФОРМАЦИИ АУТОГЕННОЙ
УСАДКИ ВО ВРЕМЕНИ**
1 – композиционное вяжущее (КВ);
2 – бездобавочный портландцемент

Figure 3

**Change in relative deformation of autogenous
shrinkage over time**
1 - composite binder (CB);
2 - pure Portland cement



Суммарная деформация усадки, $\epsilon \times 10^{-6}$ определяли суммированием аутогенной и влажностной усадки. Результаты определений представлены в табл. 1.

The total shrinkage strain, $\epsilon \times 10^{-6}$, was determined by summing the autogenous and moisture shrinkage. The results are presented in Table 1.

ТАБЛИЦА 1 СУММАРНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ УСАДКИ
Table 1 Total shrinkage deformation

Наименование образца Name of the sample	Относительная деформация аутогенной усадки ($\times 10^{-6}$), через час Relative deformation of autogenous shrinkage ($\times 10^{-6}$), after an hour		Относительная деформация, обусловленная высыханием (влажностная усадка) ($\times 10^{-6}$); через сут Relative deformation due to drying (wet shrinkage) ($\times 10^{-6}$); after after days		Полная относительная деформация усадки ($\times 10^{-6}$), через сут Total relative shrinkage deformation ($\times 10^{-6}$), after days	
	10	30	28	90	28	90
Портландцемент Portland cement	17	135	249	206	366	515
Композиционное вяжущее Composite binder (CB)	0	0,01	196	320	225	410

Суммарная деформация усадки образцов из портландцемента в возрасте 90 сут. достигает 515×10^{-6} , при этом на деформации аутогенной усадки приходится 60 % (309×10^{-6}). При отсутствии аутогенной усадки у образцов из композиционного вяжущего в процессе дальнейшего высушивания достаточно интенсивно развиваются деформации, вызванные влажностной усадкой. Суммарная деформация усадки образцов КВ достигает 410×10^{-6} , однако доля деформаций аутогенной усадки составляет лишь 22 %. Положительное влияние на снижение деформаций аутогенной усадки оказывает частичная замена портландцемента сульфоалюмоферритным цементом, вызывающем расширение твердеющей системы, но не обеспечивающей снижение влажностной усадки.

Электронномикроскопические исследования структуры затвердевшей цементной пасты показали, что в начальный момент (через 2 суток гидратации) структура портландцемента рыхлая и состоит из слабо связанных глобул плохо закристаллизованных гидросиликатов кальция, покрывающие как исходные зерна цементных минералов, так и сростки гидроксида кальция. При этом вся структура пронизана как воздушными, так и порами, заполненными водой (рис. 4 а).

Структура затвердевшего композиционного вяжущего в возрасте 2 суток представляет собой более упорядоченную структуру за счет закономерных сростков кристаллических кристаллогидратов игольчатого и волокнистого типа. В межкристаллитном пространстве которых просматриваются плохо закристаллизованные кристаллогидраты гидросиликатов кальция. Структура также пронизана воздушными и водонасыщенными порами (рис.4 б).

The total shrinkage deformation of Portland cement samples at the age of 90 days reaches 515×10^{-6} , with autogenous shrinkage deformation accounting for 60% (309×10^{-6}). In the absence of autogenous shrinkage in samples made of composite binder, deformations caused by moisture shrinkage develop quite intensively during further drying. The total shrinkage deformation of KV samples reaches 410×10^{-6} , but the share of autogenous shrinkage deformations is only 22%. A positive effect on reducing autogenous shrinkage deformations is achieved by partially replacing Portland cement with sulfoaluminoferrite cement, which causes expansion of the hardening system but does not reduce moisture shrinkage.

Electron microscopic studies of the structure of hardened cement paste showed that at the initial moment (after 2 days of hydration) the structure of Portland cement is loose and consists of weakly bound globules of poorly crystallized calcium hydrosilicates, covering both the original grains of cement minerals and intergrowths of calcium hydroxide. Moreover, the entire structure is permeated with both air and pores filled with water (Fig. 4 a).

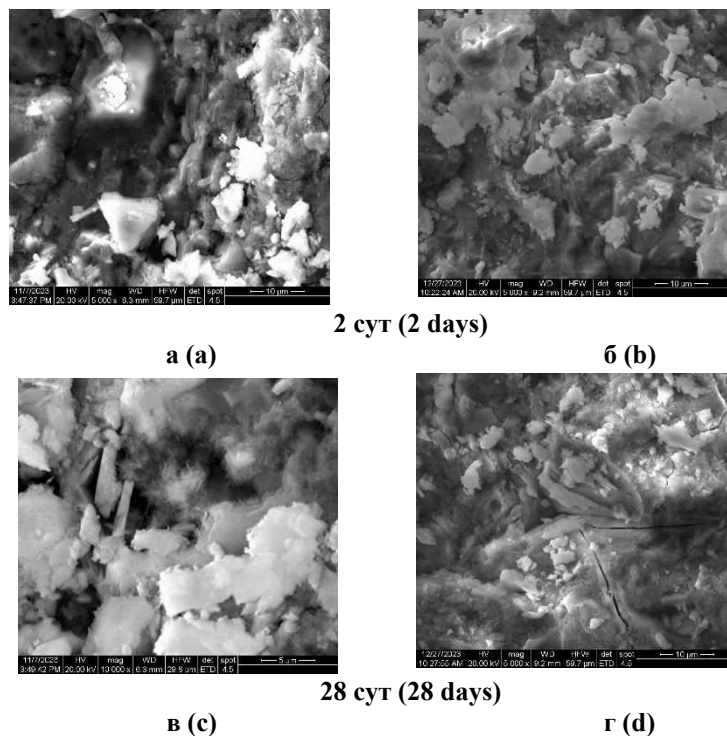
The structure of the hardened composite binder at the age of 2 days is a more ordered structure due to the regular intergrowths of crystalline crystal hydrates of the needle-shaped and fibrous type. Poorly crystallized calcium silicate hydroxides are visible in the intercrystalline space. The structure is also permeated with air and water-saturated pores (Fig. 4b).

РИСУНОК 4

ЭЛЕКТРОННОМИКРОСКОПИЧЕСКИЕ СНИМКИ ЗАТВЕРДЕВШЕЙ ЦЕМЕНТНОЙ ПАСТЫ в возрасте 2 сут. и 28 сут. а, в – бездобавочный портландцемент; б, г – композиционное вяжущее (КВ)

Figure 4

Electron micrographs of hardened cement paste at the age of 2 days and 28 days. a, b - pure Portland cement; b, d - composite binder (CB)



Структура затвердевшей цементной пасты в возрасте 28 суток портландцемента согласно [4] имеет блочную структуру. Блоки имеют разную направленность кристаллизации гидросиликатов, но при этом находятся в тесном контакте друг с другом. Блоки пронизаны сетью

The structure of the hardened cement paste at the age of 28 days of Portland cement, according to [4], has a block structure. The blocks have different directions of crystallization of hydrosilicates, but at the same time they are in close contact with each other. The blocks are permeated with a

капилляров, образованных гидросиликатами кальция. Поры, содержащие воду, отсутствуют, но фиксируются воздушные поры (рис.4 в).

Структура затвердевшего композиционного вяжущего в возрасте 28 суток согласно [4] характеризуется монотонной структурой без явных блоков. Водонасыщенные поры также отсутствуют, а воздушные поры заполнены игольчатыми кристаллогидратами (рис.4 г), из-за чего структура является более плотной. Образование такой плотной структуры обусловлено за счет образования прочного кристаллического самоподдерживающего каркаса из новообразований кристаллогидратов в твердеющей цементной пасте.

Введение сульфоалюмоферритного цемента в состав композиционного вяжущего способствует повышению прочности цементного камня (рис.5). Прочность образцов из композиционного вяжущего в 2 сут. на 30% выше контрольного состава, а в 28 сут. – на 15%. Полученные данные свидетельствуют о том, что сульфоалюмоферритный цемент способствует набору ранней прочности в большей степени, чем в более поздние сроки.

network of capillaries formed by calcium hydrosilicates. Water-containing pores are absent, but air pores are present (Fig. 4c).

The structure of the hardened composite binder at the age of 28 days, according to [4], is characterized by a monotonous structure without obvious blocks. Water-saturated pores are also absent, and air pores are filled with needle-shaped crystal hydrates (Fig. 4 g), due to which the structure is denser. The formation of such a dense structure is due to the formation of a strong crystalline self-supporting framework from newly formed crystal hydrates in the hardening cement paste.

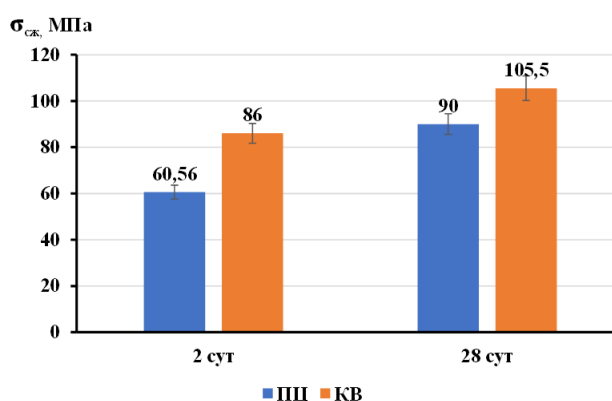
The introduction of sulfoaluminoferrite cement into the composition of the composite binder helps to increase the strength of the cement stone (Fig. 5). The strength of samples made from composite binder at 2 days is 30% higher than the control composition, and at 28 days – 15%. The obtained data indicate that sulfoaluminoferrite cement promotes early strength gain to a greater extent than at later stages.

РИСУНОК 5

Прочность цементного камня
- бездобавочный портландцемент (ПЦ);
- композиционное вяжущее (КВ)

Figure 5

Strength of cement stone
- Portland cement;
- Composite binder (CB)



Заключение

Эффективные способы минимизации усадочного трещинообразования в бетоне может достигаться за счет создания безусадочной структуры, образованной прочным кристаллическим самоподдерживающим каркасом из новообразований кристаллогидратов в твердеющей цементной пасте композиционного вяжущего, состоящего из портландцемента и сульфоалюмоферритного цемента.

Управления процессами формирования структурного каркаса в начальный период гидратации и твердения цемента в составе бетона может достигаться при частичной замене портландцемента эквивалентным количеством тонкомолотого сульфоалюмоферритного цемента.

Замена части портландцемента добавкой, позволяющей создавать прочной кристаллический каркас (в данном исследовании сульфоалюмоферритным цементом) способствует снижению деформаций аутогенной усадки без ухудшения прочностных характеристик бетона.

Экспериментальными исследованиями показано, что суммарная деформация усадки образцов из портландцемента в возрасте 90 сут. достигает 515×10^{-6} , при этом на деформации аутогенной усадки приходится 60 %

Conclusion

Effective methods for minimizing shrinkage cracking in concrete can be achieved by creating a shrinkage-free structure formed by a strong crystalline self-supporting framework of newly formed crystal hydrates in the hardening cement paste of a composite binder consisting of Portland cement and sulfoaluminoferrite cement.

Control of the processes of formation of the structural framework in the initial period of hydration and hardening of cement in the composition of concrete can be achieved by partially replacing Portland cement with an equivalent amount of finely ground sulfoaluminoferrite cement.

Replacing part of the Portland cement with an additive that allows the creation of a strong crystalline framework (in this study, sulfoaluminoferrite cement) helps to reduce autogenous shrinkage deformations without deteriorating the strength characteristics of concrete.

Experimental studies have shown that the total shrinkage deformation of Portland cement samples at the age of 90 days reaches 515×10^{-6} , with autogenous shrinkage deformation accounting for 60% (309×10^{-6}). The total shrinkage deformation of KV samples reaches 410×10^{-6} , the share of autogenous shrinkage deformations is 22%.

(309×10^{-6}). Суммарная деформация усадки образцов КВ достигает 410×10^{-6} , доля деформаций аутогенной усадки составляет 22 %.

Применение композиционного вяжущего в составе бетона может обеспечивать получение мало дефектных, надежных и долговечных строительных конструкций из бетона и железобетона.

Литература

1. Савин, А.В. К проблеме коррозионной стойкости железобетона / А.В. Савин, В.С. Лесовик, Н.И. Алфимова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, - 2016. - №2. С. 7-12.
2. Розенталь, Н.К. Бетоны высокой коррозионной стойкости и нормирование их характеристик / Н.К. Розенталь // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. Кровельные и изоляционные материалы, - 2017. - №3-4. С. 16-21.
3. Ерофеев, В.Т. Повышение коррозионной стойкости цементных композитов активными добавками / В.Т. Ерофеев // Строительные материалы и технологии. - 2020. - №2. С. 51-60.
4. Самченко, С. В. Формирование и генезис структуры цементного камня : монография / С. В. Самченко. — М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, – 2016. — 284 с. — ISBN 978-5-7264-1313-6. — Текст: электронный // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/49874.html> EDN: XNAINH
5. Mora Ruacho, J. Influence of shrinkage reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete / J. Mora Ruacho, R. Gettu, A. Aguado // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol. 39. – P. 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.011>
6. Panchenko, A. I. Durability of the concrete based on a sulphate-aluminate cement / A. I. Panchenko, Y. M. Bazhenov, I. Y. Kharchenko // American Concrete Institute, ACI Special Publication, Moscow, 06–07 июня 2018 года. Vol. 326. – Moscow: American Concrete Institute, 2018. – EDN OLTZIO.
7. Несветаев Г.В., Усадочные деформации и раннее трещинообразование бетона / Г.В. Несветаев, С.А. Тимонов // Современные проблемы строительного материаловедения/ Пятые академические чтения. - Воронеж: ВГАСА, 1999. – С. 312-316.
8. Несветаев Г.В., Щербинина Т.А. К вопросу нормирования усадки цементных бетонов // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №5 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/07TVN515.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. <https://doi.org/10.15862/07TVN515> EDN: VJKQYT
9. Козлова В.К., Божок Е.В., Логвиненко В.В., Саркисов Ю.С., Ильевский Ю.А. Усадочные деформации строительных материалов и пути их снижения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 5. С. 140–155. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-5-140-155> EDN: YLJJNB
10. Чан Л.Х., Чумаков Л.Д. Деформативные свойства особо тяжелого самоуплотняющегося бетона // Вестник МГСУ. 2011. №2-259-261
11. Гувалов А. А. Способы уменьшения аутогенной усадки в высокопрочных бетонах // Azerbaijan Chemical Journal. 2012. №2. – 95-99
12. Cusson, D. Internal curing of high performance concrete with presoaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking / D. Cusson, T. Hoogveen // Cement and Concrete Research. – 2008. –Vol. 38. – P. 757–765. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.001>
13. Кузнецова, Т. В. Микроскопия материалов цементного производства / Т. В. Кузнецова ; Т. В. Кузнецова, С. В. Самченко. – Москва: МИКХиС, Изд.-полиграфический центр, 2007. – ISBN 978-5-98523-054-3. – EDN QNEKMJ.

The use of composite binders in concrete can ensure the production of low-defect, reliable and durable building structures made of concrete and reinforced concrete.

References:

1. Savin, A.V. K probleme korrozionnoy stoykosti zhelezobetona / A.V. Savin, V.S. Lesovik, N.I. Alfimova // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova, - 2016. - №2. S. 7-12.
2. Rozental', N.K. Betony vysokoy korrozionnoy stoykosti i normirovanie ih harakteristik / N.K. Rozental' // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tehnologii XXI veka. Krovel'nye i izolyacionnye materialy, - 2017. - №3-4. S. 16-21.
3. Erofeev, V.T. Povyshenie korrozionnoy stoykosti cementnykh kompozitov aktivnymi dobavkami / V.T. Erofeev // Stroitel'nye materialy i tehnologii. - 2020. - №2. S. 51-60.
4. Samchenko, S. V. Formirovanie i genезis struktury cementnogo kamnya: monografiya / S. V. Samchenko. — M.: Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet, Ay Pi Er Media, EBS ASV, – 2016. — 284 s. — ISBN 978-5-7264-1313-6. — Tekst: elektronnyy // Elektronno-bibliotchnaya sistema IPR BOOKS: [sayt]. — URL: <http://www.iprbookshop.ru/49874.html> EDN: XNAINH
5. Mora Ruacho, J. Influence of shrinkage reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete / J. Mora Ruacho, R. Gettu, A. Aguado // Cement and Concrete Research. – 2009. – Vol. 39. – P. 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.011>
6. Panchenko, A. I. Durability of the concrete based on a sulphate-aluminate cement / A. I. Panchenko, Y. M. Bazhenov, I. Y. Kharchenko // American Concrete Institute, ACI Special Publication, Moscow, 06–07 июня 2018 года. Vol. 326. – Moscow: American Concrete Institute, 2018. – EDN OLTZIO.
7. Nesvetaev G.V., Usadochnye deformacii i rannee treschinoobrazovanie betona / G.V. Nesvetaev, S.A. Timonov // Sovremennyye problemy stroitel'nogo materialovedeniya / Pyatye akademicheskie chteniya. - Voronezh: VGASA, 1999. – S. 312-316.
8. Nesvetaev G.V., Scherbinina T.A. K voprosu normirovaniya usadki cementnykh betonov // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE» Tom 7, №5 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/07TVN515.pdf> (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana. Yaz. rus., angl. <https://doi.org/10.15862/07TVN515> EDN: VJKQYT
9. Kozlova V.K., Bozhok E.V., Logvinenko V.V., Sarkisov Yu.S., Il'evskiy Yu.A. Usadochnye deformacii stroitel'nykh materialov i puti ih snizheniya // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2018. T. 20. № 5. S. 140–155. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2018-20-5-140-155> EDN: YLJJNB
10. Chan L.H., Chumakov L.D. Deformativnyye svoystva osobo tyazhelogo samouplotnyayushegosya betona // Vestnik MGSU. 2011. №2-259-261
11. Guvalov A. A. Sposoby umen'sheniya autogennoy usadki v vysokopronnykh betonah // Azerbaijan Chemical Journal. 2012. №2. – 95-99
12. Cusson, D. Internal curing of high performance concrete with presoaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking / D. Cusson, T. Hoogveen // Cement and Concrete Research. – 2008. –Vol. 38. – P. 757–765. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.02.001>
13. Kuznecova, T. V. Mikroskopiya materialov cementnogo proizvodstva / T. V. Kuznecova ; T. V. Kuznecova, S. V. Samchenko. – Moskva: MIKHiS, Izd.-poligraficheskij centr, 2007. – ISBN 978-5-98523-054-3. – EDN QNEKMJ.

14. Тейлор, Х.Ф.У. Химия цемента / Х.Ф.У. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
15. Назарова, А.В. Эффективные способы минимизации усадочного трещинообразования в цементобетоне / А.В. Назарова, Ал-Маршди Косай Сахиб Ради, Д.С. Коваленко // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Современные строительные материалы. – 2017. – 2(124). – С. 65 – 70 EDN: ZBAYZT
16. Bentz, D. P. Protected paste volume in concrete. Extension to using saturated lightweight fine aggregate / D. P. Bentz, K. A. Snyder // Cement and Concrete Research. – 1999. – Vol. 29, No. 11. – P. 1863–1867. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00178-7); EDN: AEFKUZ
17. Гусев, Б. В. Технология портландцемента и его 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 XМАYRX.
18. Кривобородов, Ю.Р. Влияние вулканических туфов на свойства цемента / Ю.Р. Кривобородов, Т.В. Кузнецова, Е.Н. Потапова // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Т.3: тез. докл. - Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2016. С. 296.
19. Влияние способов активации на структурно-технологические характеристики наномодифицированных цементных композиций / Н. О. Копаница, О. В. Демьяненко, А. А. Куликова [и др.] // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2022. – Т. 14, № 6. – С. 481-492. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492>. – EDN PFYSQZ.
20. Игнатова, О.А. Применение топливосодержащих отходов для получения трещиностойких монолитных бетонов / О. А. Игнатова, А.Т. Пименов, Е.А. Полянская // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2010. №15 (191).
21. Ларсен, О. А. Критерии оценки структурно-технологических характеристик бетона / О. А. Ларсен, В. В. Воронин, С. В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, № 2. – С. 129-143. – EDN QXSDZK.
22. Особенности применения поликарбоксилатных гиперпластификаторов Melflux / П.Г. Василик, И.В. Голубев // Строительные материалы. - 2003. - №9. - С. 24-26. EDN: ИВЕКЕН
23. Effects of shrinkagereducing admixture in shrinkage compensating concrete / M. Collepardi, A. Borsoi, S. Collepardi, JJ. Ogoumah Olagot, R. Troli // Concrete International. – 2005. – Vol. 27, No. 10. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.020>
24. Самоуплотняющийся бетон с компенсированной усадкой с использованием материалов из бетонного лома / С. В. Самченко, В. В. Воронин, О. А. Ларсен, В. В. Наруть // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. – № 2(746). – С. 71-78. – <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78>. – EDN EYNTLL.
25. Кривобородов, Ю. Р. Специальные цементы: разновидности, свойства и применение / Ю. Р. Кривобородов // Техника и технология силикатов. – 2023. – Т. 30, № 1. – С. 84-91. – EDN BANTUI
26. Осокин, А. П. Цементы с повышенной коррозионной стойкостью / А. П. Осокин, Ю. Р. Кривобородов, С. В. Самченко. – Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 2002. – 56 с. – EDN TSSFVX.
27. Пути повышения коррозионной стойкости вяжущих и цементных систем: монография / Козлова В. К. - Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2024. - 124 с. - ISBN 978-5-6050247-6-7. EDN: EOQWYK
28. Самченко, С. В. Влияние дисперсности специального цемента на структуру твердеющего камня / С. В. Самченко, Ю. Р. Кривобородов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2003. – № 5-2. – С. 238-240. – EDN TOGQHR.
14. Teylor, H.F.U. Himiya cementa / H.F.U. Teylor. – M.: Mir, 1996. – 560 s.
- Nazarova, A.V. Effektivnyye sposoby minimizatsii usadochnogo treschinooobrazovaniya v cementobetone / A.V. Nazarova, Al-Marshdi Kosay Sahib Radi, D.S. Kovalenko // Vestnik Donbasskoy nacional'noy akademii stroitel'stva i arhitektury. Sovremennyye stroitel'nyye materialy. – 2017. – 2(124). – S. 65 - 70 EDN: ZBAYZT
16. Bentz, D. P. Protected paste volume in concrete. Extension to using saturated lightweight fine aggregate / D. P. Bentz, K. A. Snyder // Cement and Concrete Research. – 1999. – Vol. 29, No. 11. – P. 1863–1867. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00178-7); EDN: AEFKUZ
17. Gusev, B. V. Tehnologiya portlandcementa i ego raznovidnostey: Uchebnoye posobie / B. V. Gusev, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. – Moskva: Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet, Ay Pi Er Media, 2016. – 113 s. – ISBN 978-5-7264-1230-6. – EDN XМАYRX.
18. Krivoborodov, Yu.R. Vliyaniye vulkanicheskikh tufov na svoystva cementa / Yu.R. Krivoborodov, T.V. Kuznecova, E.N. Potapova // XX Mendeleevskiy s'ezd po obschey i prikladnoy himii. T.3: tez. dokl. - Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie RAN, 2016. S. 296.
19. Vliyaniye sposobov aktivatsii na strukturno-tehnologicheskie harakteristiki nanomodifitsirovannykh cementnykh kompozitsiy / N. O. Kopanica, O. V. Dem'yanenko, A. A. Kulikova [i dr.] // Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyy internet-zhurnal. – 2022. – T. 14, № 6. – S. 481-492. – <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492>. – EDN PFYSQZ.
20. Ignatova, O.A. Primeneniye toplivosoderzhaschikh othodov dlya polucheniya treschinostoykikh monolitnykh betonov / O. A. Ignatova, A.T. Pimenov, E.A. Polyanskaya // Vestnik YuUrGU. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. 2010. №15 (191).
21. Larsen, O. A. Kriterii ocenki strukturno-tehnologicheskikh harakteristik betona / O. A. Larsen, V. V. Voronin, S. V. Samchenko // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2023. – T. 30, № 2. – S. 129-143. – EDN QXSDZK.
22. Osobennosti primeneniya polikarboksilatnykh giperplastifikatorov Melflux / P.G. Vasilik, I.V. Golubev // Stroitel'nyye materialy. - 2003. - №9. - S. 24-26. EDN: ИВЕКЕН
23. Effects of shrinkagereducing admixture in shrinkage compensating concrete / M. Collepardi, A. Borsoi, S. Collepardi, JJ. Ogoumah Olagot, R. Troli // Concrete International. – 2005. – Vol. 27, No. 10. – P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.09.020>
24. Samouplotnyayuschiyasya beton s kompensirovannoy usadkoy s ispol'zovaniem materialov iz betonnoogo loma / S. V. Samchenko, V. V. Voronin, O. A. Larsen, V. V. Narut' // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo. – 2021. – № 2(746). – С. 71-78. – <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2021-746-2-71-78>. – EDN EYNTLL.
25. Krivoborodov, Yu. R. Special'nyye cementy: raznovidnosti, svoystva i primeneniye / Yu. R. Krivoborodov // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2023. – T. 30, № 1. – S. 84-91. – EDN BANTUI
26. Osokin, A. P. Cementy s povyshennoy korrozionnoy stoykost'yu / A. P. Osokin, Yu. R. Krivoborodov, S. V. Samchenko. – Moskva: Rossiyskiy himiko-tehnologicheskii universitet im. D.I. Mendeleeva, 2002. – 56 s. – EDN TSSFVX.
27. Puti povysheniya korrozionnoy stoykosti vyazhushchikh i cementnykh sistem: monografiya / Kozlova V. K. - Tomsk: Tomskiy gosudarstvennyy arhitekturno-stroitel'nyy universitet, EBS ASV, 2024. - 124 s. - ISBN 978-5-6050247-6-7. EDN: EOQWYK
28. Samchenko, S. V. Vliyaniye dispersnosti special'nogo cementa na strukturu tverdeyushchego kamnya / S. V. Samchenko, Yu. R. Krivoborodov // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G. Shuhova. – 2003. – № 5-2. – S. 238-240. – EDN TOGQHR.
29. Samchenko, S. V. Vliyaniye dispersnosti rasshiryayushchegosya komponenta na svoystva cementov / S. V. Samchenko, D. A. Zorin

29. Самченко, С. В. Влияние дисперсности расширяющегося компонента на свойства цементов / С. В. Самченко, Д. А. Зорин // Техника и технология силикатов. – 2006. – Т. 13, № 2. – С. 2-7. – EDN KWMZHD.
30. 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.
31. Самченко С.В. Электронно-микроскопические исследования цементного камня, подвергнутого сульфатной агрессии // Цемент и его применение. 2005. № 1. С. 36.
32. Самченко С. В. Роль этtringита в формировании и генезисе структуры камня специальных цементов. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2005 – 154 с. EDN: QNDVZV
33. Cumbreira, F.L.; Sanchez-Bajo, F. The use of the JMAYK kinetic equation for the analysis of solid-state reactions: Critical considerations and recent interpretations. Thermochim. Acta. 1995, 266, 315.
- // Tehnika i tehnologiya silikatov. – 2006. – Т. 13, № 2. – С. 2-7. – EDN KWMZHD.
30. 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.
31. Samchenko S.V. Elektronno-mikroskopicheskie issledovaniya cementnogo kamnya, podvergnutogo sul'fatnoy agressii // Cement i ego primenenie. 2005. № 1. S. 36.
32. Samchenko S. V. Rol' ettringita v formirovani i genezise struktury kamnya special'nyh cementov. – М.: RHTU im. D. I. Mendeleeva, 2005 – 154 s. EDN: QNDVZV
33. Cumbreira, F.L.; Sanchez-Bajo, F. The use of the JMAYK kinetic equation for the analysis of solid-state reactions: Critical considerations and recent interpretations. Thermochim. Acta. 1995, 266, 315.

Работа выполнена в НИУ МГСУ. Испытания проводились с использованием исследовательского оборудования Головного регионального совместного исследовательского центра Национального исследовательского Московского государственного строительного университета.

Tests were carried out using research equipment of The Head Regional Shared Research Facilities of the Moscow State University of Civil Engineering

Самченко Светлана Васильевна – заведующая кафедрой СМ, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Email: samchenko@list.ru

Ларсен Оксана Александровна – доцент кафедры СМ, к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ). E-mail: larsen.oksana@mail.ru

Тоболев Павел Дмитриевич – аспирант кафедры СМ, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», Email: toboleff@yandex.ru (автор для связи)

Вклад авторов: Тоболев П.Д., Ларсен О.А. – проведение экспериментов, обработка материала, написание статьи, Самченко С.В. – идея, научное руководство, редактирование статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Samchenko Svetlana Vasilyevna - Head of the Department of SM, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, Email: samchenko@list.ru

Larsen Oksana Alexandrovna - Associate Professor of the SM, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), E-mail: larsen.oksana@mail.ru

Tobolev Pavel Dmitrievich - graduate student of the Department of SM, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University, Email: toboleff@yandex.ru (author for contact)

Contribution of the author: Tobolev P.D., Larsen O.A. – 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.