

Л.Ф. КАЗАНСКАЯ¹, О.М. СМЕРНОВА²¹ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,
г. Санкт-Петербург, Россия²ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Россия

ДЕСТРУКЦИЯ БЕТОНА НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТНО-ШЛАКОВЫХ ВЯЖУЩИХ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация. Железобетонные конструкции пола животноводческих комплексов в процессе эксплуатации подвергаются интенсивным воздействиям. В основном в конструкциях пола используются бетоны на портландцементе. Была проведена сравнительная оценка влияния органической среды на прочностные и деформационные свойства бетона на основе портландцемента, шлакопортландцемента и сульфатно-шлаковых вяжущих с различными активаторами твердения. Установлено, что составы на основе комплексно-активированных сульфатно-шлаковых вяжущих обладают наилучшей стойкостью в агрессивной органической среде животноводческих помещений по сравнению с образцами бетона на основе портландцемента и шлакопортландцемента.

Ключевые слова: сульфатно-шлаковые вяжущие, бесклнкерные вяжущие, деструкция бетона в органической среде, бетонная стяжка пола, животноводческий комплекс, агрессивная среда.

L.F. KAZANSKAYA¹, O.M. SMIRNOVA²¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia²Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

DESTRUCTION OF CONCRETE BASED ON SULFATE-SLAG BINDERS IN AGGRESSIVE ENVIRONMENTS OF LIVESTOCK COMPLEXES

Abstract. Reinforced concrete floor structures of livestock complexes are subjected to intense impacts during operation. Concretes based on Portland cement are mainly used in floor structures. A comparative assessment of the influence of the organic medium on the strength and deformation properties of concrete based on Portland cement, slag-Portland cement and sulfate-slag binders with various hardening activators was carried out. It has been stated that compositions based on complex-activated sulfate-slag binders have the best resistance in the aggressive organic environment of livestock premises compared with concrete samples based on Portland cement and slag-Portland cement.

Keywords: sulfate-slag binders, clinker-free binders, destruction of concrete in an organic environment, concrete floor screed, livestock complex, aggressive environment.

Введение

Первичной защитой железобетонных конструкций от коррозии, осуществляемой на этапе проектирования, является правильный выбор типа цемента. Исследования коррозии бетона на основе портландцемента при воздействии на него органических сред, формирующихся в результате жизнедеятельности микроорганизмов, показывают его низкую коррозионную стойкость. В результате реакции биогенных кислот и других продуктов жизнедеятельности микроорганизмов с компонентами цементного камня бетона образуются растворимые соли кальция, которые вымываются из структуры, что приводит к разрушению бетона [1,2].

© Казанская Л.Ф., Смирнова О.М., 2023

В работе [3] показано, что в результате воздействия грибов *Aspergillus niger* в поровую структуру бетона проникает смесь органических кислот: лимонной, щавелевой, молочной, яблочной, винной. При грибковой коррозии большее воздействие на бетон оказывает лимонная кислота, т.к. ее содержание составляет более 50% в продуктах жизнедеятельности микроорганизмов. Показано, что грибковая коррозия протекает быстрее бактериальной, что способствует тому, что коррозия арматуры в бетоне при грибковой коррозии начнется через 2,5 года воздействия, при бактериальной – через 5,5 лет.

В результате жизнедеятельности грибов в бетоне выделяются органические кислоты: лимонная, уксусная, щавелевая и другие. В результате взаимодействия бетона с кислотами происходит вымывание гидроксида кальция из тела бетона в виде растворимых солей и, как следствие, образование пор. В качестве модельной среды, имитирующей процессы жизнедеятельности грибов, используются растворы органических кислот, с различным соотношением [4-6].

Во влажной среде скорость биокоррозии обуславливает надежность и долговечность бетонных конструкций. Разрушение цементных бетонов при биологической коррозии определяется процессами массопереноса. Во многих работах выполнено построение расчетных математических моделей коррозии бетонов на основе портландцемента с учетом биогенного фактора [7-11]. Представлены результаты численного эксперимента с целью изучения влияния коэффициентов массопроводности и массоотдачи на кинетику и динамику процесса [12]. Однако, исследования биологической коррозии в основном проводятся на бетоне на основе портландцемента.

Среди способов повышения биологического сопротивления бетонов на основе портландцемента выделяют следующие: введение добавок, которые могут образовывать буферные системы, способные ослаблять воздействие на цементные бетоны органических кислот; обработка поверхности композитов веществами, способными отталкивать микроорганизмы и среды, необходимые для их жизнедеятельности; использование активных сред, способных формировать на поверхности материала плотные и инертные слои [13-15].

Выбор типа цемента при специфических видах коррозии в органических средах, при сложных видах коррозии, может быть одним из экономически целесообразным решением. В работах [16-18] предложена концепция кольматации, позволяющая теоретически обосновывать и выбирать типы цементов для долговечных железобетонных конструкций с учетом отдельных видов коррозии в органических средах. Показано, что самоторможение коррозионных процессов, обусловленное образованием малорастворимых продуктов коррозии, которые в основном кольматируют открытые поры бетона, зависит от растворимости продуктов коррозии. Стойкие виды цементов для некоторых видов коррозии в органических средах известны, хотя не все механизмы их полностью освещены в литературе [18, 19].

Конструкция пола животноводческих комплексов в процессе эксплуатации подвергается интенсивным воздействиям, в том числе воздействиям органической среды. Общепринято использовать цементные бетоны для устройства полов животноводческих комплексов. В настоящее время интенсивные исследования проводятся по разработке бесклнкерных вяжущих [20-22]. Процессы, приводящие к коррозионной деструкции строительных цементных композитов, в т. ч. бетонов на основе бесклнкерных вяжущих, протекают в несколько стадий. При контакте агрессивной среды с поверхностью конструкции происходит химическое взаимодействие между агрессивной средой и структурой композита с последующим растворением и смыванием продуктов химической реакции с поверхности конструкции.

Процессы, которые происходят при коррозионной деструкции цементной матрицы бетона, объединены учеными в три группы [23-25]. Первая группа объединяет процессы, когда агрессивная среда растворяет и вымывает составляющие структуры композита. Вторая группа объединяет процессы, когда агрессивная среда химически взаимодействует со

структурными компонентами композита с образованием веществ, которые растворяются и вымываются водой. Третья группа объединяет процессы, когда агрессивная среда химически взаимодействует со структурными компонентами композита с образованием малорастворимых водой веществ большего объема, чем исходные компоненты. Увеличение объема веществ в поровой структуре и микротрещинах композита ведет к появлению внутренних напряжений и разрушению материала [26, 27].

Рассмотрение сульфатно-шлаковых вяжущих представляется возможным, учитывая их низкое выделение парниковых газов: сульфатно-шлаковый цемент содержит более 70% доменного шлака и его производство не требует высокотемпературного обжига, в отличие от портландцементного клинкера. К преимуществам сульфатно-шлакового цемента можно отнести: меньшее тепловыделение при гидратации по сравнению с портландцементом, использование побочных продуктов промышленности при его производстве, что способствует утилизации твердых отходов. К недостаткам сульфатно-шлакового цемента можно отнести: нельзя смешивать с другим типом цемента, не рекомендуется использовать при температурах близких к 0°C, т.к. скорость набора прочности значительно снижается, для твердения требуются влажные условия, иначе влага с поверхности высыхает и образуется порошкообразную поверхность.

Сульфатно-шлаковый цемент может применяться для фундаментов, лежащих в химически агрессивных грунтах, благодаря его высокой сульфатостойкости; для бетонирования морских сооружений, т.к. может противостоять воздействию морской воды лучше, чем портландцемент; для изготовления железобетонных труб, которые предполагается заглублять в сульфатсодержащие грунты.

Коррозионная деструкция бетона обусловлена изменением прочностных свойств при эксплуатации конструкции в зависимости от интенсивности и продолжительности воздействия на материал агрессивных жидких сред. Целью работы является изучение предела прочности при сжатии, предела прочности при изгибе, коэффициента стойкости бетонов на основе портландцемента, шлакопортландцемента и сульфатно-шлаковых вяжущих двойной активации после воздействия агрессивной среды животноводческих комплексов. В настоящее время сульфатно-шлаковые вяжущие, в которых активатором твердения шлака выступает сульфат-содержащий компонент, изучены достаточно подробно [28-30]. Для повышения прочности в работе предложено использовать второй активатор твердения.

Методы и материалы

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы-призмы с размером 25×25×100 мм на основе раствора с соотношением вяжущего к песку, равным 1:3. Строительный песок фракции менее 2,5 мм был использован. Растворные смеси имели одинаковую подвижность с изменяющимся водо-вяжущим отношением В/В, представленным в таблице 1. Составы вяжущих представлены в таблице 1. В качестве второго активатора твердения выбраны: цементная пыль – отход производства портландцементного клинкера по сухому способу, известь, известь-содержащий отход фармацевтической промышленности.

Таблица 1 - Составы вяжущих

№	В/Вяж	Состав вяжущего		
		75% шлак	15% фосфогипс	10% цементной пыли
1	0,48	75% шлак	15% фосфогипс	10% цементной пыли
2	0,47	75% шлак	15% фосфогипс	10% известь
3	0,47	75% шлак	15% фосфогипс	10% известь-содержащий отход фармацевтической промышленности
4	0,38	100% ПЦ	-	-
5	0,41	100% ШПЦ	-	-

Образцы твердели 28 суток в нормально-влажностных условиях, затем образцы помещали в жидкие среды, такие как, водопроводная питьевая вода, искусственная агрессивная среда, представленная смесью 2% растворов щавелевой, молочной и уксусной кислот, а также естественная агрессивная среда животноводческих помещений. Данные среды были выбраны на основе обследования авторами и их коллегами более 20 животноводческих комплексов республики Башкортостан в период с 2000 по 2015 гг. Продолжительность хранения в этих средах составляла 105 и 150 суток. Далее определялась коррозионная стойкость образцов по отношению к агрессивному воздействию этих сред по коэффициенту стойкости $K_{ст}$. Он равен отношению величины среднего арифметического значения предела прочности при изгибе после хранения образцов в агрессивной среде к величине предела прочности при изгибе после такого же срока хранения образцов в питьевой воде. Предел прочности при сжатии был определен после 270-суточного хранения в вышеуказанных средах. Получены сравнительные результаты по изменению предела прочности при сжатии после хранения в воде, в искусственной агрессивной среде и в агрессивной среде животноводческих помещений. При испытаниях разброс значений не превышал 3%.

Результаты и обсуждение

Сравнительные результаты по определению предела прочности на растяжение при изгибе образцов после хранения в разных средах представлены на рисунке 1.

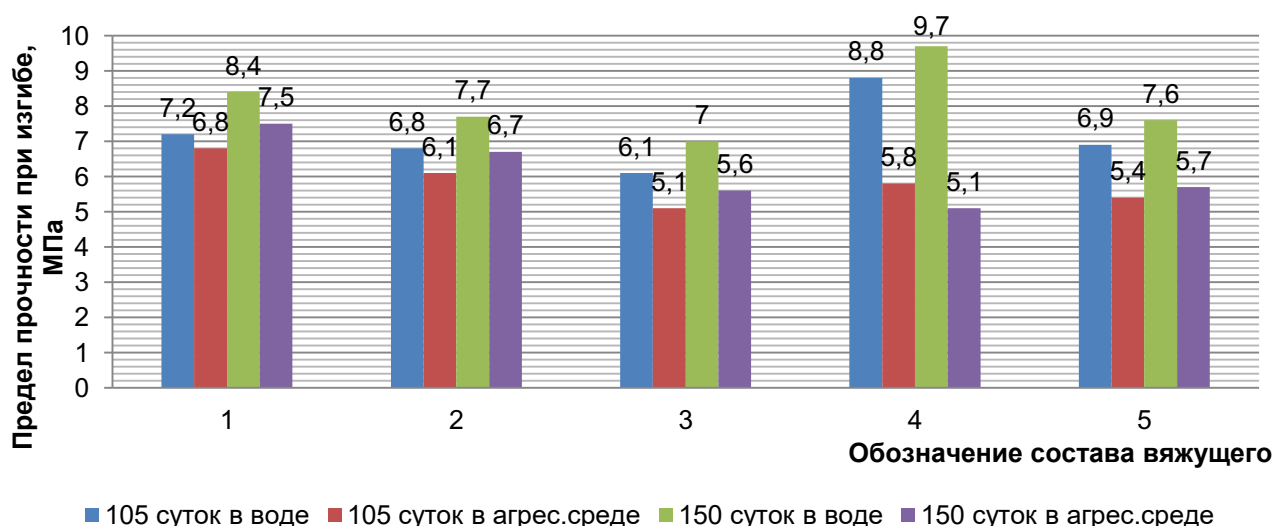


Рисунок 1 - Предел прочности на растяжение при изгибе образцов на основе различных вяжущих

Составы 1, 2 и 3 отличаются активатором твердения, который был добавлен к смеси шлака и гипса. Как видно из рисунка 1 наибольшее значение предела прочности при изгибе среди составов 1-3 получено при использовании в качестве активатора твердения цементной пыли. Этот состав интересен тем, что при хранении в агрессивной среде в течение 150 суток предел прочности при изгибе увеличился по сравнению с пределом прочности образцов после хранения в воде 105 суток. В остальных составах наблюдалось снижение предела прочности при изгибе после хранения образцов в агрессивной среде. Наибольшее снижение наблюдалось в образцах на портландцементе, у которых коэффициент стойкости составил 0,66 после 105 суток хранения в агрессивной среде и 0,53 после 150 суток хранения в агрессивной среде (рисунок 2).

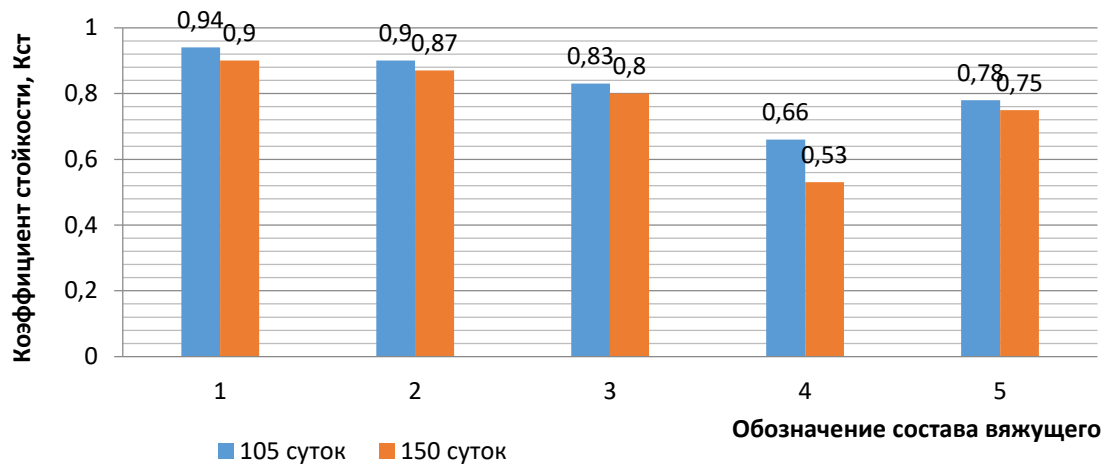


Рисунок 2 - Коэффициент стойкости образцов на основе различных вяжущих после хранения в агрессивной среде

Наибольший коэффициент стойкости после хранения в агрессивной среде получен у образцов на сульфатно-шлаковом вяжущем с активатором твердения – цементная пыль, немного меньше – у образцов с активатором твердения - известь. У образцов на сульфатно-шлаковом вяжущем, в котором в качестве активатора твердения использован известь-содержащий отход фармацевтической промышленности коэффициент стойкости оказался выше, чем у образцов на портландцементе и шлакопортландцементе.

Результаты испытаний образцов и определения предела прочности при сжатии после хранения 270 суток в вышеуказанных средах представлены на рисунке 3.

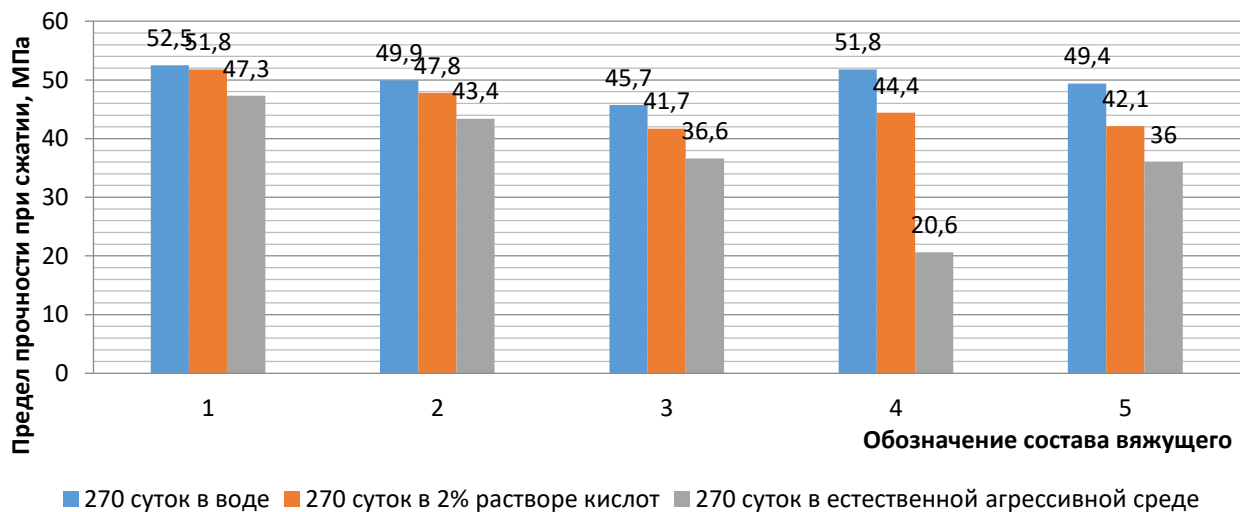


Рисунок 3 - Предел прочности на сжатие образцов после 270-суточного хранения в разных средах

Как видно из рисунков 1-3 активатор твердения в сульфатно-шлаковых вяжущих двойной активации имеет большое значение и влияет на изменение прочностных свойств после воздействия агрессивной среды животноводческих помещений. Наибольшей деструкции подвержены бетоны на основе портландцемента, сопоставимая деструкция у бетонов на основе шлакопортландцемента и сульфатно-шлакового вяжущего с известь-содержащим отходом фармацевтической промышленности, меньшей деструкции подвержен бетон на сульфатно-шлаковом вяжущем с известью, и наименьшей деструкции - бетон, в котором в качестве активатора твердения использована цементная пыль.

Наименьшую стойкость в агрессивной среде животноводческих комплексов имеет бетон на основе портландцемента. Предел прочности при изгибе образцов на основе портландцемента уменьшается почти в два раза после 150 суток хранения в агрессивной среде. Разработанное сульфатно-шлаковое вяжущее двойной активации состава 1 (таблица 1), содержащее в качестве активатора твердения 10% цементной пыли, имеет наилучшую стойкость в агрессивной среде с коэффициентом стойкости $K_{ст} = 0,90$.

После длительного хранения образцов камня сульфатно-шлакового вяжущего различных составов в агрессивной среде определены изменение массы (рисунок 4), а также был проведён анализ глубины коррозии с помощью микроскопа МИН-8. Толщина прородированного слоя находилась в пределах 1,3...2,1 мм, а коэффициент агрессивности среды, вычисленный по методике А.Ф. Полака [31], составлял от 0.25 до 0.5 мм/год. При использовании портландцемента глубина прородированного слоя возрастает в 1,5...2 раза, а при использовании шлакопортландцемента в 1,2...1,4 раза по сравнению с образцами 1-3.

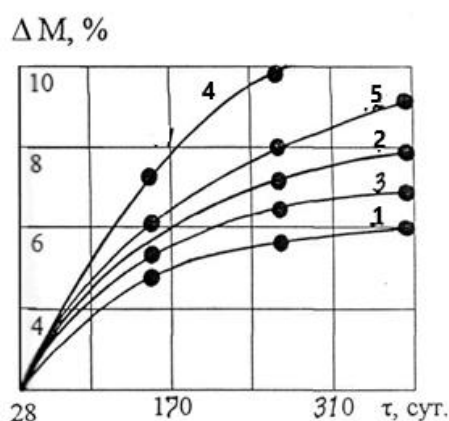


Рисунок 4 - Изменение массы образцов сульфатно-шлаковых вяжущих, подверженных воздействию агрессивных сред в зависимости от вида щелочной добавки (нумерация составов в соответствии с таблицей 1)

Следует отметить, что процесс деструкции и снижения прочностных характеристик образцов на основе портландцемента в агрессивной среде является интенсивным, имеет прогрессирующий характер до полного разрушения образцов. Изменение прочностных характеристик образцов на основе сульфатно-шлакового вяжущего двойной активации замедляется со временем и можно наблюдать затухающий характер коррозионного процесса.

Следует отметить, что в естественной агрессивной среде изменение прочностных характеристик образцов происходит интенсивнее по сравнению с 2% раствором низкомолекулярных карбоновых кислот, который использовался для моделирования данной среды. Это свидетельствует о значительно более агрессивном влиянии на бетон сложного состава естественной среды животноводческих комплексов.

Повышенная стойкость образцов на сульфатно-шлаковом вяжущем двойной активации в агрессивных средах животноводческого производства обусловлена формированием микроструктуры композита и минералогического состава продуктов гидратации. Таким образом, особенности физико-химических процессов при твердении сульфатно-шлаковых вяжущих с известь-содержащим активатором твердения необходимо учитывать для обеспечения стабильных физико-технических свойств бетонов.

Растворение глинозема шлака обеспечивается в условиях высокого насыщения раствора ионами SO_4^{2-} . В этих условиях по сквозь растворному механизму формируется кристаллогидратный сросток - высокосульфатная форма гидросульфоалюмината кальция – этtringит ($C_3A \cdot 3CS \cdot 31H$). Он размещается в межзерновом пространстве и уплотняет камень без проявления расширения и деструкции. Оптимальная скорость растворения фазы Al_2O_3 соответствует содержанию в гидратной фазе раствора оксида кальция в количестве 0,6-0,8 г/л, что соответствует содержанию в составе сульфатно-шлакового вяжущего извести в

количестве 1-1,2% (по $\text{CaO}_{\text{акт}}$). В этих условиях в растворе имеет место соотношение $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaSO}_4=1/(3...5)$, благоприятное для формирования и устойчивости этtringита от возможной перекристаллизации в моносulfат кальция. Концентрация CaO в растворе ниже 0,5 г/л замедляет растворение содержащихся в шлаке алюминатов, снижает количество образующегося этtringита и не обеспечивает набора высокой прочности камнем вяжущего. При высокой концентрации CaO в растворе 1,0-1,2 г/л и выше, алюминаты кальция резко теряют способность растворяться. Это вызывает кристаллизацию этtringита на поверхности гранул шлака, формируются плотные оболочки из этtringита, замедляющие процессы растворения и гидратации вяжущего, что приводит к проявлению расширения твердеющего цементного камня и резкому снижению прочности.

Для сульфатно-шлакового вяжущего с 20% гипса на первом этапе формируется этtringит, также значительная доля Al_2O_3 связывается также в гидроалюминаты кальция. Важно, чтобы формирование продуктов гидратации, а именно кристаллических гидросульфoалюминатов кальция высокоосновной формы заканчивалось в начальный период твердения, когда твердеющее тесто обладает пластическими свойствами и объемные изменения, возникающие при кристаллизации этtringита, не нарушают структуру [32, 33].

Продуктами твердения сульфатно-шлакового вяжущего являются: кристаллический гидросульфoалюминат $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$ (этtringит), коллоидный гидросиликат $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и кристаллический гидроалюминат $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Первые два продукта гидратации свойственны любому сульфатно-шлаковому вяжущему, они преобладают и обуславливают его прочность. Третий продукт гидратации-кристаллический гидроалюминат $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ может образовываться, либо отсутствовать в зависимости от состава шлака и в незначительной степени влияет на прочность.

Образование трёхкальцевого гидросульфoалюмината при эксплуатации конструкции из сульфатно-шлакового вяжущего в сульфатных водах следует рассматривать как продолжение процесса сульфoалюминатного твердения. Этот процесс способствует дальнейшему нарастанию прочности. Наличие большого количества трёхкальцевого гидросульфoалюмината в структуре продуктов гидратации сульфатно-шлакового вяжущего двойной активации повышает прочность на растяжение при изгибе, а модуль упругости у образцов на основе шлаковых вяжущих, значительно меньше, чем у образцов на основе портландцемента. Эти два фактора положительно влияют на сохранение прочностных и деформативных свойств бетона после длительной эксплуатации в агрессивных коррозионных средах.

Выводы

Снижение воздействия производства строительных материалов на истощение природных ресурсов и выбросы парниковых газов возможно при изготовлении бесклнкерных вяжущих на основе отходов промышленности. В работе предложено использовать сульфатно-шлаковые вяжущие двойной активации, в которых в качестве второго активатора могут применяться: цементная пыль – отход производства портландцементного клнкера по сухому способу, известь или известь-содержащий отход фармацевтической промышленности. Были определены предел прочности при сжатии, предел прочности при изгибе, коэффициента стойкости бетонов на основе портландцемента, шлакопортландцемента и сульфатно-шлаковых вяжущих двойной активации после воздействия агрессивной среды животноводческих комплексов продолжительностью 105, 150 и 270 суток. При хранении в воде наибольшие значения предела прочности при сжатии и при изгибе показали образцы на основе портландцемента. При хранении в агрессивной среде наибольшей деструкции подвержены бетоны на основе портландцемента. Сопоставимая деструкция наблюдалась у бетонов на основе шлакопортландцемента и сульфатно-шлакового вяжущего с известь-содержащим отходом фармацевтической промышленности. Меньшей деструкции подвержен бетон на сульфатно-шлаковом вяжущем с известью, и наименьшей деструкции - бетон, в котором в качестве активатора твердения использована цементная пыль, образующаяся при производстве клнкера по сухому способу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Коновалова В.С., Караваев И.В. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из бетона, содержащего гидрофобизирующие добавки // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2017. № 6 (372). С. 268-276.
2. Федосов С.В., Нармания Б.Е. Кинетика коррозионного массопереноса в цементных бетонах в условиях воздействия грибковых микроорганизмов. В сборнике: Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт. Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти академика РААСН Чернышова Е.М.. 2022. С. 197-201.
3. Строкин К.Б., Новиков Д.Г., Коновалова В.С., Логинова С.А., Нармания Б.Е. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из железобетона в условиях микробиологической коррозии // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 4 (37). С. 62-69.
4. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Морозов Е.А. Микроорганизмы разрушители материалов и изделий // Изв. вузов. Строительство. 2001. № 8. С. 4 – 12.
5. Строганов В.Ф., Куколева Д.А., Бараева Л.Р. Метод испытания минеральных строительных материалов на биостойкость в модельных агрессивных средах // Вестник Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. № 3. С. 153 – 161.
6. Чеснокова Т.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Изучение грибковой коррозии бетона с помощью модельной среды // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2019. № 3 (59). С. 85-89.
7. Ерофеев В.Т., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биокоррозия цементных бетонов, особенности ее развития, оценки и прогнозирования // Фундаментальные исследования. 2014. № 12. Ч. 4. С. 708–716.
8. Румянцева В.Е., Гоглев И.Н., Логинова С.А. Применение полевых и лабораторных методов определения карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 15 (67). С. 51–58.
9. Селяев В.П., Неверов В.А., Селяев П.В., Сорокин Е.В., Юдина О.А. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций с учетом сульфатной коррозии бетона // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1. С. 41–52.
10. Семенов С.А., Гумаргалиева К.З., Калинина И.Г., Заиков Г.Е. Биоразрушения материалов и изделий техники // Вестник МИТХТ. 2007. Т. 2. № 6. С. 3–26.
11. Степанова В. Ф. Долговечность бетона. Москва: Ассоциация строительных вузов, 2014. 126 с.
12. Румянцева В.Е., Логинова С.А., Карцева Н.Е. Математическое моделирование коррозии бетонных конструкций в биологически агрессивных средах // Вестник Череповецкого государственного университета. 2021. № 3 (102). С. 56-67.
13. Ерофеев В.Т., Аль Д.С.Д.С., Федорцов А.П., Богатов А.Д., Федорцов В.А. Биологическая коррозия бетонов // Строительные материалы. 2020. № 11. С. 13-23.
14. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А., Гоглев И.Н. Исследование стойкости цементного камня к биокоррозии. В сборнике: Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2019 году. Сборник научных трудов РААСН. Российская академия архитектуры и строительных наук. Москва, 2020. С. 472-476.
15. Строкин К.Б., Новиков Д.Г., Коновалова В.С., Касьяненко Н.С. Влияние микроорганизмов на физико-механические свойства бетона // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2021. № 10. С. 90-98.
16. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М. Обоснование выбора типа вяжущего для агрессивных сред органического происхождения на основе теории гетерогенных физико-химических процессов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. Т. 1. № 9. С. 159-163.
17. Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М. Повышение коррозионной стойкости бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей // Монография. Белгород, Изд-во БГТУ, 2015. 321 с.
18. Рахимбаев Ш.М., Карпачева Е.Н., Толыпина Н.М. О выборе типа цемента на основе теории кольтмации при сложном составе агрессивной среды // Бетон и железобетон. 2012. № 5. С. 25–26.
19. Брыков А.С. Сульфатная коррозия портландцементных бетонов // Цемент и его применение. 2014. № 6. С. 96–103.
20. Rakhimova N. R., Rakhimov R. Z. Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials // Journal of Non-Crystalline Solids. 2019. 509, 31-41.
21. Петрова Т.М. Взаимосвязь структуры и долговечности шлакощелочных бетонов на основе доменных и сталеплавильных шлаков // Вестник гражданских инженеров. 2012. № 4 (33). С. 167-173.

22. Amran M., Fediuk R., Abdelgader H.S., Murali G., Ozbakkaloglu T., Lee Y.H., Lee Y.Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: a review // *Journal of Building Engineering*. 2022. Т. 45. С. 103638.
23. Yakovlev G., Polyanskikh I., Gordina A., Pudov I., Černý V., Gumenyuk A., Smirnova O. Influence of sulphate attack on properties of modified cement composites // *Applied Sciences*. 2021. 11(18), 8509.
24. Ерошкина Н.А., Чамурлиев М.Ю., Коровкин М.О. Сернокислотная коррозия геополимерных бетонов с минеральными добавками на основе отходов // *Транспортные сооружения*. 2019. Т. 6. № 3. С. 25.
25. Гришина А.Н., Королев Е.В., Михеев А.В., Гладких В.А. Влажностные деформации бетона, подверженного щелочной коррозии. Экспериментальные результаты // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 6 (83). С. 140-148.
26. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. Влияние содержания добавок термоактивированной глины на свойства и состав продуктов твердения композиционного шлакощелочного вяжущего с низким содержанием щелочного активатора // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. № 2 (56). С. 50-59.
27. Федюк Р.С. Свойства композиционных вяжущих на основе техногенных отходов Дальнего Востока // *Вестник гражданских инженеров*. 2016. № 2 (55). С. 132-136.
28. Kazanskaya L.F., Smirnova O.M. Supersulphated Cements with Technogenic Raw Materials // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. 9(11). Pp. 3006–3012.
29. Смирнова О.М., Казанская Л.Ф. Гибридные цементы на основе гранулированных доменных шлаков: основные направления исследований // *Эксперт: теория и практика*. 2022. № 3 (18). С. 59-65.
30. Mehdizadeh H., Kani E.N., Sanchez A.P., Fernandez-Jimenez, A. (2018). Rheology of activated phosphorus slag with lime and alkaline salts // *Cement and Concrete Research*, 113, 121-129.
31. Полак А.Ф., Бабков В.В., Андреева Е.П. Твердение минеральных вяжущих веществ. Уфа: Башк. кн. изд-во, 1990. 216 с.
32. Казанская Л.Ф., Макаров Ю.И., Григорьев Д.С. Прочность и стойкость многокомпонентных минеральных вяжущих на основе техногенного сырья // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2014. № 1 (38). С. 75-81.
33. Казанская Л.Ф., Смирнова О.М. Вяжущие щелочной активации: стремление к альтернативе портландцементу // *Цемент и его применение*. 2015. № 2. С. 137-140

REFERENCES

1. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Karavaev I.V. Determination of the resource of safe operation of concrete structures containing hydrophobic additives // *Izvestiya vuzov. Technology of the textile industry*. 2017. No. 6 (372). Pp. 268-276.
2. Fedosov S.V., Narmania B.E. Kinetics of corrosive mass transfer in cement concretes under the influence of fungal microorganisms. In the collection: Sustainable development of the region: architecture, construction and transport. Materials of the ixth International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Academician of the Russian Academy of Sciences Chernyshov E.M. 2022. Pp. 197-201.
3. Strokin K.B., Novikov D.G., Konovalova V.S., Loginova S.A., Narmania B.E. Determination of the resource of safe operation of reinforced concrete structures in conditions of microbiological corrosion // *Modern problems of civil protection*. 2020. No. 4 (37). Pp. 62-69.
4. Solomatov V.I., Erofeev V.T., Morozov E.A. Microorganisms destroyers of materials and products // *Izv. vuzov. Construction*. 2001. No. 8. Pp. 4-12.
5. Stroganov V.F., Kukoleva D.A., Baraeva L.R. Method of testing mineral building materials for biostability in model aggressive environments // *Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. 2011. No. 3. Pp. 153 – 161.
6. Chesnokova T.V., Rumyantseva V.E., Loginova S.A. The study of fungal corrosion of concrete with the help of a model medium // *Modern science-intensive technologies. Regional application*. 2019. No. 3 (59). Pp. 85-89.
7. Erofeev V.T., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biocorrosion of cement concrete, features of its development, evaluation and forecasting // *Fundamental research*. 2014. No. 12. Ch. 4. Pp. 708-716.
8. Rumyantseva V.E., Goglev I.N., Loginova S.A. Application of field and laboratory methods for determining carbonation, chloride and sulfate corrosion in the examination of building structures of buildings and structures // *Construction and technogenic safety*. 2019. No. 15 (67). Pp. 51-58.
9. Selyaev V.P., Neverov V.A., Selyaev P.V., Sorokin E.V., Yudina O.A. Forecasting the durability of reinforced concrete structures taking into account sulfate corrosion of concrete // *Civil Engineering magazine*. 2014. No. 1. Pp. 41-52.
10. Semenov S.A., Gumargalieva K.Z., Kalinina I.G., Zaikov G.E. Biodegradation of materials and engineering products // *Vestnik MITKHT*. 2007. Vol. 2. No. 6. Pp. 3-26.

11. Stepanova V.F. Durability of concrete. Moscow: Association of Construction Universities, 2014. 126 p.
12. Rumyantseva V.E., Loginova S.A., Kartseva N.E. Mathematical modeling of corrosion of concrete structures in biologically aggressive environments // Bulletin of Cherepovets State University. 2021. No. 3 (102). Pp. 56-67.
13. Erofeev V.T., Al D.S.D.S., Fedortsov A.P., Bogatov A.D., Fedortsov V.A. Biological corrosion of concrete // Building Materials. 2020. No. 11. Pp. 13-23.
14. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Loginova S.A., Goglev I.N. Investigation of the resistance of cement stone to biocorrosion. In the collection: Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019. Collection of scientific works of the RAASN. Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. Moscow, 2020. Pp. 472-476.
15. Strokin K.B., Novikov D.G., Konovalova V.S., Kasyanenko N.S. The effect of microorganisms on the physical and mechanical properties of concrete // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2021. No. 10. Pp. 90-98.
16. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M. Substantiation of the choice of the type of binder for aggressive media of organic origin based on the theory of heterogeneous physico-chemical processes // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2016. Vol. 1. No. 9. Pp. 159-163.
17. Rakhimbayev Sh.M., Tolypina N.M. Improving the corrosion resistance of concrete by rational choice of binder and fillers // Monograph. Belgorod, Publishing House of BSTU, 2015. 321 p.
18. Rakhimbayev Sh.M., Karpacheva E.N., Tolypina N.M. On the choice of the type of cement based on the theory of colmatation with a complex composition of an aggressive medium // Concrete and reinforced concrete. 2012. No. 5. Pp. 25-26.
19. Brykov A.S. Sulfate corrosion of Portland cement concretes // Cement and its application. 2014. No. 6. Pp. 96-103.
20. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. Toward clean cement technologies: A review on alkali-activated fly-ash cements incorporated with supplementary materials // Journal of Non-Crystalline Solids. 2019. 509, 31-41.
21. Petrova T.M. Interrelation of structure and durability of slag-alkaline concretes based on blast furnace and steelmaking slags // Bulletin of Civil Engineers. 2012. No. 4 (33). Pp. 167-173.
22. Amran M., Fediuk R., Abdelgader H.S., Murali G., Ozbakkaloglu T., Lee Y.H., Lee Y.Y. Fiber-reinforced alkali-activated concrete: a review // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 45. Pp. 103638.
23. Yakovlev G., Polyanskikh, I., Gordina A., Pudov I., Černý V., Gumenyuk A., Smirnova O. Influence of sulfate attack on properties of modified cement composites // Applied Sciences. 2021. 11(18), 8509.
24. Eroshkina N.A., Chamurliov M.Yu., Korovkin M.O. Sulfuric acid corrosion of geopolymer concrete with mineral additives based on waste // Transport structures. 2019. Vol. 6. No. 3. P. 25
25. Grishina A.N., Korolev E.V., Mikheev A.V., Gladkikh V.A. Moisture deformations of concrete subject to alkaline corrosion. Experimental results // Bulletin of Civil Engineers. 2020. No. 6 (83). Pp. 140-148.
26. Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. The effect of the content of additives of thermally activated clay on the properties and composition of the hardening products of a composite slag-alkaline binder with a low content of an alkaline activator // Izvestiya Kazan State Architectural and Construction University. 2021. No. 2 (56). Pp. 50-59.
27. Fedyuk R.S. Properties of composite binders based on technogenic waste of the Far East // Bulletin of Civil Engineers. 2016. No. 2 (55). Pp. 132-136.
28. Kazanskaya L.F., Smirnova O.M. Supersulphated Cements with Technogenic Raw Materials // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. 9(11). Pp. 3006-3012.
29. Smirnova O.M., Kazanskaya L.F. Hybrid cements based on granular blast furnace slags: main research directions // Expert: theory and practice. 2022. No. 3 (18). Pp. 59-65.
30. Mehdizadeh H., Kani E.N., Sanchez A.P., Fernandez-Jimenez A. (2018). Rheology of activated phosphorus slag with lime and alkaline salts // Cement and Concrete Research, 113, 121-129.
31. Polak A.F., Babkov V.V., Andreeva E.P. Hardening of mineral binders. Ufa: Bashkir Publishing House, 1990. 216 p.
32. Kazanskaya L.F., Makarov Yu.I., Grigoriev D.S. Strength and durability of multicomponent mineral binders based on technogenic raw materials // News of the St. Petersburg University of Railway Transport. 2014. No. 1 (38). Pp. 75-81.
33. Kazanskaya L.F., Smirnova O.M. Alkaline activation binders: striving for an alternative to Portland cement // Cement and its application. 2015. No. 2. Pp. 137-140.

Информация об авторах:

Казанская Лилия Фаатовна

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,
г. Санкт-Петербург, Россия,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Строительные материалы и технологии».
E-mail: yalifa@inbox.ru

Смирнова Ольга Михайловна

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Россия,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительство горных предприятий и подземных
сооружений».
E-mail: smirnovaolgam@rambler.ru

Information about authors:

Kazanskaya Liliya F.

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg, Russia,
doctor in technical sciences, docent, professor of the department of «Building Materials and Technologies».
E-mail: yalifa@inbox.ru

Smirnova Olga M.

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia,
candidate in technical sciences, docent, associate professor of the department Constructing Mining Enterprises and
Underground Structures.
E-mail: smirnovaolgam@rambler.ru