

УДК 691.545

**ПУЦЦОЛАНОВЫЕ ДОБАВКИ: КЛАССИФИКАЦИЯ, СВОЙСТВА И
ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ****Хугаев Илар Анатольевич,**

Юго-Осетинский государственный университет им. А.А. Тибилова, Цхинвал

Преподаватель кафедры инженерно-технических дисциплин

E-mail: ilar.khugaty@gmail.ru

Дзагоев Виталий Владимирович,

Юго-Осетинский государственный университет им. А.А. Тибилова, г. Цхинвал

Старший преподаватель кафедры инженерно-технических дисциплин

E-mail: dzagoevvita1965@gmail.com

Аннотация

Статья посвящена изучению пуццоланов - активных минеральных добавок, которые значительно улучшают свойства цементных бетонов благодаря химическим реакциям с гидроксидом кальция, образующимся при гидратации портландцемента.

Рассматриваются физико-химические свойства пуццоланов, их классификация на природные, искусственные и промышленные, а также влияние этих добавок на эксплуатационные характеристики бетона. В статье представлен обзор отечественного и зарубежного опыта использования пуццоланов в бетонных смесях, подчеркивающий важность стандартизации и контроля качества сырья.

Уделяется внимание вызовам, с которыми сталкивается внедрение пуццоланов в строительстве, таким как нестабильность качества и сложности дозирования.

В заключение подчеркивается необходимость системного подхода к оптимизации рецептур и методов применения пуццоланов для повышения эффективности их использования в тяжелых бетонных смесях, что может привести к созданию более прочных и долговечных конструкций.

Ключевые слова: пуццоланы, цементные бетоны, активные минеральные добавки, высокая прочность.

**POZZOLANIC ADDITIVES: CLASSIFICATION, PROPERTIES, AND
DOMESTIC EXPERIENCE****Ilar A. Khugaev,**

Lecturer of the Department of Engineering and Technical Disciplines

A.A. Tibilov South Ossetian State University, Tskhinval

E-mail: ilar.khugaty@gmail.ru

Vitaliy V. Dzagoev,

Senior Lecturer, Department of Engineering and Technical Disciplines,
A.A. Tibilov South Ossetian State University, Tskhinval
E-mail: dzagoevvita1965@gmail.com

ABSTRACT

The article discusses pozzolanic additives as active mineral components that enhance the properties of cement concretes through chemical reactions with calcium hydroxide formed during the hydration of Portland cement.

The classification of pozzolans into natural, artificial, and industrial types is described, along with their physical and chemical properties that influence their activity and effectiveness in concrete mixtures.

The article also explores domestic experience in the application of pozzolans, emphasizing the importance of standardization and quality control of the raw materials used. Challenges associated with the implementation of pozzolanic additives, such as quality instability and dosing difficulties, are also addressed.

In conclusion, the necessity of a systematic approach to recipe optimization is highlighted to improve the strength and durability of construction structures.

Keywords: pozzolans, cement concretes, active mineral additives, high strength.

Актуальность. Общие сведения о пуццоланах

Пуццоланы представляют собой активные минеральные добавки, обладающие способностью способствовать улучшению свойств цементных бетонов посредством химических реакций, протекающих с гидроксидом кальция, образующимся в процессе гидратации портландцемента. Их природное происхождение предполагает наличие в составе пористых, аморфных или полиморфных фаз, богатых оксидами кремния и алюминия, что определяет их активность и потенциал для повышения эксплуатационных характеристик бетона [2].

На химическом уровне пуццоланы, главным образом, содержат кремнезем и глинозем, в соединении с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), образуют устойчивые силикатные и алюминатные соединения, которые способствуют укреплению структуры бетона и его долговечности. Механизм взаимодействия пуццолановых добавок с цементным гидратом заключается в формировании дополнительных силикатных кремнеземных соединений (C-S-H), что способствует повышению плотности и связанных между ними свойств бетона, таких как прочность и устойчивость к воздействию внешних факторов [2]. В этом контексте, особенности химического состава и физико-химические свойства пуццоланов оказывают решающее влияние на их активность, где высокая удельная поверхность и аморфность способствуют более скорому и полному протеканию реакций гидратации.

Природные пуццоланы, например, вулканические породы или пемза, отличаются высокой реакционной способностью при правильных условиях твердения, что делает их особенно ценными в производстве тяжелых цементных бетонов с высокой ранней прочностью. Эти материалы способны активировать процессы гидратации цемента и ускорить достигаемый в первые сроки каркасный набор прочности.

Важным аспектом является также их химическая стабильность и отсутствие вредных примесей, что обеспечивает долгосрочную устойчивость получаемого бетона [6].

Например, в отечественной практике широко используются природные пуццоланы, такие как вулканические продукты, и их применение позволяет не только повысить начальную прочность, но и значительно улучшить показатели долговечности за счет снижения проницаемости и сопротивления коррозии. В результате, добавление пуццоланов способствует развитию более плотных микроструктур внутри бетона, что связано с образованием новых силикатных соединений на границе между вяжущими и минеральными добавками, это особенно важно для тяжелых бетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах. В процессе гидратации происходит активное взаимодействие компонентов, что позволяет гидратным продуктам проникать и заполнять поры, тем самым уменьшая пористость и повышая стойкость к механическим и химическим воздействиям [6]. Такой механизм особенно актуален для создания бетонов с высокой ранней прочностью, поскольку ускорение реакции позволяет сокращать сроки строительства и повышает надежность сооружений.

Следует подчеркнуть, что эффективность пуццолановых добавок во многом зависит от их физико-химических свойств, таких как степень аморфности и содержание оксидов кремния и алюминия. Чем выше активность минерала, тем более выраженным является его влияние на ускорение гидратационных процессов и формирование плотных структурных связей внутри бетона.

Отечественный опыт свидетельствует о том, что оптимальный подбор пуццоланов с учетом их химического состава и структуры позволяет создавать бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками, продолжительной и устойчивой прочностью, а также повышенной долговечностью. В практике отечественного производства широко применяются различные виды природных пуццоланов, что подтверждает их значимость как экологически чистых и доступных добавок, способствующих решению задач повышения качества тяжелых цементных бетонов [2].

В целом, использование пуццолановых добавок представляет собой стратегический подход к совершенствованию состава бетонных смесей, направленный на обеспечение высокой ранней прочности, а также долговечности и устойчивости к внешним воздействиям.

Исследования. Классификация пуццоланов и их свойства

Классификация пуццоланов по происхождению и составу представляет важнейший аспект для определения их активных свойств и возможности использования в тяжёлых цементных бетонах с высокой ранней прочностью. Согласно существующей классификации, пуццоланы подразделяются на природные, искусственные и промышленного производства. Природные пуццоланы формируются в процессе природных геохимических процессов и характеризуются преимущественно высоким содержанием аморфных форм кремнезёма и алюминия, что способствует их активной реакции с гидроксидом кальция в цементных системах [1].

Одним из ключевых физических свойств, определяющих активность пуццоланов, является удельная поверхность. Чем выше удельная поверхность, тем большее количество поверхностных активных центров доступно для взаимодействия с гидроксидом кальция, что увеличивает интенсивность реакции пуццолана и способствует формированию более плотных и прочных продуктов гидратации. Также важным является степень аморфности - чем выше уровень аморфных компонентов, тем более активными считаются пуццоланы, поскольку аморфные фазы легче вступают в реакцию с гидроксидом кальция, образуя термостойкие силикатные и алюмосиликатные соединения, усиливающие связывающие свойства бетона.

В заключение стоит отметить, что содержание оксидов кремния и алюминия напрямую влияет на реактивность добавки, при этом их соотношение определяет продуктивность процессах полимеризации и уплотнения матрицы цементного камня [5].

Обобщая состав и свойства, можно отметить, что подбор пуццолановых добавок требует учета их физических и химических характеристик для достижения оптимальной активности и улучшения свойств бетона. В частности, высокая удельная поверхность и значительный уровень аморфных фаз позволяют активировать реакции гидратации в кратчайшие сроки, что особенно важно при изготовлении тяжёлых бетонов с высокой ранней прочностью.

Природные пуццоланы, такие как диатомитовые земли, имеют высокую активность за счёт их пористой структуры и аморфных кремнезёмов. В то же время, искусственные и промышленного происхождения пуццоланы, изготовленные, например, на основе шлаков или пепла, требуют особых технологических обработок для повышения их физико-химических показателей [1]. Следует подчеркнуть, что уровень селективного подбора пуццоланов позволяет не только повысить механические характеристики бетона, но и значительно улучшить его долговечность, стойкость к агрессивным средам, а также оптимизировать расход цемента, что является важным направлением в современном строительстве.

Отечественный опыт использования пуццоланов подтверждает актуальность их классификации и активной оценки свойств, для разработки эффективных бетонных смесей. В российской практике большое значение приобрели природные пуццоланы, такие как туфы и пещерные породы, характеризующиеся высоким содержанием аморфных кремнезёмов и алюминия, что способствует их высокой реактивности [1].

Кроме того, широкое применение нашли промышленно произведённые пуццоланы на основе шлаков металлургического производства и активных добавок, произведённых методом механической активации с использованием устройств вихревого слоя. Эти процессы позволяют повышать удельную поверхность и активность добавок, что значительно влияет на развитие фаз гидратации и формирование прочностных характеристик бетона: «Увеличение площади поверхности и аморфности способствует более быстрой и интенсивной реакции с гидроксидом кальция, что позволяет получать бетоны с высокой начальной прочностью» [5].

Важнейшим аспектом является также селективный подбор компонентов, направленный на гармонизацию свойств цементных систем, что способствует созданию бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками и высокой стойкостью. Таким образом, классификация пуццоланов по происхождению и составу - фундаментальный этап, определяющий их реакционную способность и место в композиции тяжёлых бетонных смесей. Необходимость точного определения физических и химических свойств, таких как удельная поверхность, степень аморфности и содержание активных оксидов, обуславливает возможность реализации комплексных подходов к их использованию и активизации.

Современный отечественный опыт демонстрирует значительный потенциал применения как природных, так и промышленно произведённых пуццоланов для оптимизации свойств бетонных материалов, что подтверждается результатами многочисленных исследований и практических внедрений [1;5].

Такой подход позволяет не только повысить раннюю прочность и механическую зернистость бетонной смеси, но и обеспечить её долговечность и устойчивость в агрессивных средах, что особенно важно при строительстве тяжёлых и высоконагруженных конструкций.

Результаты исследований. Обзор отечественного и зарубежного опыта использования пуццоланов в бетонных смесях

В современной практике применения пуццолановых добавок в бетонных смесях, как отечественной, так и зарубежной, наблюдается широкий спектр технологий, методов и подходов, которые позволяют достигать различных целей: повышение долговечности, ускорение твердения, снижение затрат и повышение экологической безопасности производства. Анализируя зарубежный опыт, можно отметить, что использование природных пуццоланов в бетонных составах осуществляется с особым акцентом на стандартизацию сырья и контроль его качества.

Так, например, в рамках зарубежных исследований, активно внедряются технологии предварительной обработки и климатического тестирования добавок для повышения их стабильности и эффективности в различных климатических условиях. В таких странах, как Италия и Греция, значительные успехи достигнуты в разработке рецептур с учетом особенностей местных природных ресурсов, адаптируя их к требованиям конкретных климатических зон и эксплуатационных нагрузок. Кроме того, отмечается большая роль технологических приемов, направленных на улучшение связности и однородности бетонных смесей при добавлении пуццоланов, что существенно влияет на показатели прочности и долговечности. Важным аспектом является стандартизация методов испытаний и характеристик, что позволяет обеспечить безопасность производства продукции на международном уровне [4].

Отечественный опыт использования пуццоланов в бетонных смесях характеризуется активной разработкой рецептур, ориентированных на применение природных пуццоланов, добываемых на территории России, с учетом их физических и химических особенностей. В рамках национальных исследований широко применяются технологические приемы, направленные на совмещение ускоренных методов твердения с обеспечением высокой прочности и долговечности на основе природных пуццоланов, что особенно актуально для тяжелых бетонов.

Важным достижением является разработка рецептурных составов с учетом особенностей местного сырья, включая использование простейших добавок и специальных методов их активации, что способствует повышению их активности в составе бетона. В отечественной практике большое значение придается изучению кинетики твердения, а также исследованию влияния пуццоланов на параметры схватывания и затвердевания цементных систем, что позволяет избегать типичных проблем с нестабильностью характеристик и обеспечивать стабильную работу технологических процессов [3]. Однако, несмотря на достижения, внедрение пуццолановых добавок в тяжелые бетонные составы сопровождается рядом вызовов и сложностей.

Одной из основных проблем остается нестабильность качества сырья, связанная с вариациями исходных природных материалов по составу, минералогическому профилю и физическим характеристикам. Это ведет к ухудшению предсказуемости технологических свойств бетонов и усложняет контроль, за конечным качеством продукции.

Кроме того, сложности дозирования и введения пуццолановых добавок связаны с необходимостью точного определения оптимальных пропорций и способов добавления, а также обеспечения равномерного распределения в смеси, что критически влияет на показатели прочности, водопроницаемости и долговечности. В практических условиях слабая совместимость пуццоланов с другими компонентами бетона, а также их чувствительность к условиям технологического процесса, создают дополнительные сложности.

Особое внимание уделяется недостаткам существующих рецептур, которые зачастую приводят к снижению ранней прочности бетона или ухудшению эксплуатационных характеристик. В частности, применение неадаптированных рецептур с природными пуццоланами часто вызывает задержки в начале твердения, что негативно сказывается на скорости производства и монтаже конструкций. Кроме того, недостаточное понимание особенностей взаимодействия пуццоланов с портландцементными системами приводит к непредсказуемости в развитии прочности, особенно в ранние сроки.

В таких случаях, существенным недостатком является снижение устойчивости бетона к воздействию агрессивных сред и повышенной влажности. На практике выявлены случаи, когда неправильно подобранные дозировки или несвоевременное выполнение технологических операций приводят к появлению трещин, расслоению или ухудшению эксплуатационных характеристик в долгосрочной перспективе. Кроме того, технологические вариации, связанные с методами активации пуццоланов, требуют более глубокого научного обоснования и стандартизации. Например, использование тепловых методов активации, такие как термосушка, помогают повысить активность добавок, но требуют точного контроля режимов, что зачастую затруднено при массовом производстве.

Также необходимо учитывать особенности сырья и климатические условия, в которых работают отраслевые предприятия, что требует разработки адаптивных рецептур и методов контроля качества. В связи с этим, возникает необходимость в системном подходе к оптимизации рецептур и методов применения пуццоланов, с учетом их специфики и особенностей местного сырья. Подведение итогов показывает, что облик отечественного и зарубежного опыта использования пуццоланов в тяжелых бетонах насыщен разнообразными технологиями и подходами, объединяемыми целью - добиться стабильных и высоких эксплуатационных характеристик конечных изделий. Однако внедрение инноваций сталкивается со многими вызовами, среди которых - необходимость создания надежных методов стандартизации, устранения факторов вариации сырья и повышения эффективности технологических решений.

Выводы

Анализируя лучшие практики и сталкиваясь с существующими недостатками, формируется понимание перспектив развития области, в которой особое место занимает развитие рецептур с учетом местных особенностей сырья и условий эксплуатации. Исторический и современный опыт демонстрируют, что грамотное сочетание технологических приемов, математического моделирования и контроля качества позволяет значительно повысить эффективность использования пуццоланов в тяжелых бетонных смесях, обеспечивая как раннюю прочность, так и долговечность конструкций [3;4].

В заключение необходимо отметить, что пуццолановые добавки представляют собой важный инструмент для улучшения свойств цементных бетонов, способствуя их прочности и долговечности. Классификация пуццоланов, их физико-химические свойства и отечественный опыт применения подчеркивают их значимость в строительной отрасли. Несмотря на существующие вызовы, такие как нестабильность качества и сложности дозирования, системный подход к оптимизации рецептур и методов применения пуццоланов может значительно повысить эффективность их использования. Это позволит не только улучшить характеристики бетонных смесей, но и создать более устойчивые и надежные конструкции, что является важным шагом к устойчивому развитию строительной индустрии.

Список литературы:

1. А. С. Успанова, А. З. Абуханов, З. Х. Исмаилова, Х-М. У. Киндаров. Влияние органоминеральной добавки на свойства штукатурных растворов на мелких песках с глинистыми примесями // Вестник ГГНТУ Технические науки. - 2021. - DOI: 10.34708/gstou.2021.84.33.010
2. Гувалов А.А., Мамедов А.Д., Кахраманов Н.Т. Влияние модификаторов на свойства битума и асфальтобетона. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. Вып. 10. - DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6383.URL:<http://journals.isuct.ru/ctj/article/download/3328/2246>
3. Гуруиненко, Н. С. Оптимизация состава комплексной полифункциональной добавки по критерию прочности цементного камня и бетона / Н. С. Гуруиненко, Э. И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. - Минск, 2020. - Вып. 12. - С. 102-119. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2020-12-07>.
4. Евгений Чернышов, Сергей Федосов, Варвара Румянцева. Развитие методов прогнозирования долговечности строительных конструкций на основе разработки теории и моделей коррозии бетонов с учетом явлений тепломассопереноса и формирования градиентных состояний // Scientific journal "academia architecture and construction". - 2023. - DOI: 10.22337/2077-9038-2023-1-89-100. - URL: <https://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/download/481/368>
5. Ибрагимов Р.А., Королёв Е.В. Фазовый состав продуктов гидратации портландцемента, механоактивированного в аппарате вихревого слоя с добавками различной природы // Academia. Архитектура и строительство. - 2023. - № 4. - С. 138-144. - DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-138-144.
6. Н.И. Бердикул, К.Акматайулы. Мелкозернистый бетон с использованием минеральных и химических добавок // Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан. - 2022. - DOI: 10.32014/2022.2518-170x.199

References:

1. Uspanova, A. S., Abukhanov, A. Z., Ismailova, Z. Kh., Kindarov, Kh.-M. U. Vliyanie organomineral'noi dobavki na svoystva shtukaturnykh rastvorov na melkikh peskakh s glinistymi primesyami [Influence of organo-mineral additives on the properties of plaster mortars based on fine sands with clay impurities]. Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie nauki [Bulletin of GSTOU. Technical Sciences]. 2021. DOI: 10.34708/gstou.2021.84.33.010.
2. Guvalov, A. A., Mamedov, A. D., Kakhrmanov, N. T. Vliyanie modifikatorov na svoystva bituma i asfal'tobetona [Influence of modifiers on the properties of bitumen and asphalt concrete]. Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya [Proceedings of Universities. Chemistry and Chemical Technology]. 2021. Vol. 64, Issue 10. DOI: 10.6060/ivkkt.20216410.6383. URL: <http://journals.isuct.ru/ctj/article/download/3328/2246>.

3. Gurinenko, N. S., Batyanovskii, E. I. Optimizatsiya sostava kompleksnoi polifunktsional'noi dobavki po kriteriyu prochnosti tsementnogo kamnya i betona [Optimization of the composition of a complex multifunctional additive according to the strength criterion of cement stone and concrete]. Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete]. Minsk: BelNIIS Institute, 2020. Issue 12. P. 102–119. DOI: 10.35579/2076-6033-2020-12-07.
4. Chernyshov, E., Fedosov, S., Rumyantseva, V. Razvitie metodov prognozirovaniya dolgovechnosti stroitel'nykh konstruksii na osnove teorii i modelei korrozii betonov s uchetom yavlenii teplomassoperenosa i formirovaniya gradientnykh sostoyanii [Development of methods for predicting the durability of building structures based on the theory and models of concrete corrosion considering heat and mass transfer phenomena and the formation of gradient states]. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]. 2023. No. 1. P. 89–100. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-1-89-100. URL: <https://aac.raasn.ru/index.php/aac/article/download/481/368>.
5. Ibragimov, R. A., Korolev, E. V. Fazovyi sostav produktov gidratatsii portlandtsementa, mekhanoaktivirovannogo v apparate vikhrevogo sloya s dobavkami razlichnoi prirody [Phase composition of Portland cement hydration products mechanoactivated in a vortex layer apparatus with additives of various nature]. Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]. 2023. No. 4. P. 138–144. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-138-144.
6. Berdikul, N. I., Akmalayuly, K. Melkozernisty beton s ispol'zovaniem mineral'nykh i khimicheskikh dobavok [Fine-grained concrete using mineral and chemical additives]. Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan. 2022. DOI: 10.32014/2022.2518-170x.199.