



СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Бакирбаева А.А.^{1*}, Бауыржанкызы Р.², Иманбаев Е.Е.³

¹ Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

² ТОО «СК ЖБИ-5», Караганда, Казахстан

³ ТОО «Экоцемент», Кокшетау, Казахстан

* Корреспондент автор: bakirbaeva.anar@mail.ru

Аннотация. В статье представлен обзор современных исследований, направленных на повышение долговечности бетонных покрытий автомобильных дорог за счёт применения минеральных добавок и модифицирующих компонентов. Рассмотрены результаты полевых и лабораторных испытаний высокообъёмных золоуносных бетонов (HVFA), смесей с гранулированным доменным шлаком (GGBS), микрокремнезёмом (silica fume), а также композитов с использованием полипропиленовых волокон. Анализ зарубежных работ демонстрирует, что замещение 30–80 % портландцемента добавками позволяет существенно снизить проницаемость, повысить морозо-, сульфат- и коррозионную стойкость, а также уменьшить углеродный след бетонных покрытий. Отмечено, что сочетание HVFA с полимерными волокнами обеспечивает дополнительную трещиностойкость и стабильные эксплуатационные характеристики. На основе обобщённых данных показано, что применение модифицированных цементобетонов является перспективным направлением для повышения долговечности дорожных покрытий в условиях агрессивных сред и значительных перепадов температур.

Ключевые слова: бетонные покрытия; долговечность; зола-унос; HVFA; GGBS; микрокремнезём; полипропиленовые волокна; проницаемость; морозостойкость; коррозионная стойкость; дорожное строительство; модифицированные бетоны.

Введение

Развитие транспортной инфраструктуры является ключевым фактором социально-экономического роста государства, а долговечность дорожных покрытий — одним из определяющих показателей эффективности капитальных вложений в дорожное строительство. Бетонные покрытия, обладая высокой прочностью, морозостойкостью и долговечностью, всё активнее внедряются в транспортную сеть многих стран, в том числе в условиях континентального климата Казахстана и других регионов с резкими перепадами температур. Однако эксплуатационные нагрузки, в том числе воздействие тяжёлого грузового транспорта, климатические факторы и агрессивные среды, постепенно приводят к снижению прочностных характеристик и появлению дефектов, таких как трещины и колееобразование.

Современные тенденции в дорожном строительстве направлены на внедрение инновационных технологий, способных продлить срок службы бетонных покрытий и снизить затраты на ремонтно-восстановительные работы. Ведущие направления исследований включают разработку модифицированных цементобетонов с применением минеральных и химических добавок, использование фибробетона для повышения трещиностойкости, введение полимерных дисперсий для улучшения адгезии и водонепроницаемости, а также внедрение наноматериалов для модификации структуры цементного камня на микроструктурном уровне.

Особое внимание в современной научной и инженерной практике уделяется комплексному подходу, при котором подбор состава бетона осуществляется с учётом специфики транспортных нагрузок, климатических условий, технологии укладки и последующего ухода за покрытием. Это позволяет обеспечить не только увеличение срока службы покрытия, но и повышение его эксплуатационных характеристик — устойчивости к колееобразованию, истиранию и температурным деформациям.

Цель настоящего обзора — систематизировать современные научные и практические достижения в области увеличения долговечности бетонных покрытий автомобильных дорог, с акцентом на использование модифицированных бетонов, фибробетона, полимерных добавок и наноматериалов, а также оценить их эффективность в предотвращении образования трещин и деформаций в процессе эксплуатации.

Методология

В рамках национальной исследовательской программы по дорожным покрытиям Федеральное управление автомобильных дорог США (FHWA) в 2019–2022 гг. провело комплексное исследование применения бетонных смесей с высоким содержанием летучей золы (High-Volume Fly Ash Concrete, HVFAC), в которых 30–50 % и более цемента заменялось золой-уносом. Целью работы являлась оценка эксплуатационных свойств таких смесей и разработка практических рекомендаций по составу, контролю качества и методикам испытаний.

Методология исследования включала как лабораторные, так и полевые испытания. В лабораторных условиях определялись показатели прочности на сжатие, проницаемости (в том числе с использованием метода ускоренного прохода хлоридов - RCPT), устойчивости к сульфатной агрессии, а также стойкости к циклам замораживания и оттаивания. Полевые испытания проводились на участках реальных автомобильных дорог, где оценивалась долговечность покрытия и динамика изменения его свойств в процессе эксплуатации.

Результаты и Обсуждение

Результаты показали, что смеси HVFAC обладают пониженной проницаемостью для хлоридов, улучшенной сульфатостойкостью и повышенной морозостойкостью, что способствует увеличению долговечности покрытия. Кроме того, применение золы-уноса в больших объемах позволяет значительно снизить углеродный след на один кубический метр бетона и сократить стоимость материала. Вместе с тем, были выявлены определенные сложности: замедленный набор ранней прочности, необходимость более тщательного контроля воздушно-пористой структуры, а также повышенные требования к качеству сырья и технологическим процессам.

В целом, исследование FHWA подтвердило, что высокозолые бетоны представляют собой перспективное решение для создания долговечных и экологически устойчивых дорожных покрытий при условии применения адаптированных методик проектирования и строгого контроля качества на всех этапах производства и укладки [1].

В рамках полевого исследования, проведённого группой американских исследователей, была выполнена оценка эксплуатационных характеристик дорожных

покрытий из бетона с высоким содержанием золы-уноса (HVFA), где до 50 % цемента заменялось золой класса С. Целью работы стало подтверждение концепции применения HVFA-бетонов в реальных условиях эксплуатации.

Исследование включало мониторинг состояния плит на опытных участках, расположенных в разных климатических зонах США. Проводились измерения прочности бетона, определение проникновения хлоридов, а также визуальный осмотр поверхности для выявления трещинообразования и деформаций.

По итогам наблюдений в течение нескольких лет было установлено, что покрытия на основе HVFA демонстрировали удовлетворительное состояние и высокую долговечность. При этом коррозионная стойкость и водонепроницаемость оказались выше, чем у контрольных составов с традиционным цементом. Основным ограничением отмечалась необходимость корректировки состава смеси для повышения ранней прочности, что особенно важно в условиях интенсивного дорожного строительства [2].

В работе Ahmad J., опубликованной в журнале *Sustainability* (MDPI), представлен всесторонний обзор применения гранулированного доменного шлака (GGBS) в производстве бетона (рисунок 1). Проведена систематизация данных по влиянию GGBS в качестве частичной замены цемента на прочностные характеристики, проницаемость, устойчивость к агрессивным средам, микроструктуру и долговечность бетонов (рисунок 1). Методологически исследование основано на мета-анализе и сопоставлении результатов лабораторных испытаний, полевых наблюдений и исследований жизненного цикла (LCA). Обобщённые результаты показывают, что при замене 25–50 % цемента на GGBS наблюдается стабильное повышение стойкости к хлоридной и сульфатной агрессии, снижение проницаемости и зачастую - рост долговременной прочности; вместе с тем, ранняя прочность может снижаться, что зависит от доли и типа клинкера. Отмечено, что использование GGBS обеспечивает значительный экологический эффект за счёт сокращения выбросов CO₂. Авторы приходят к выводу, что GGBS является эффективной минеральной добавкой для дорожных бетонов, особенно в условиях агрессивных воздействий и при необходимости повышения долговечности, однако требует адаптированных режимов твердения и контроля ранней прочности [3].

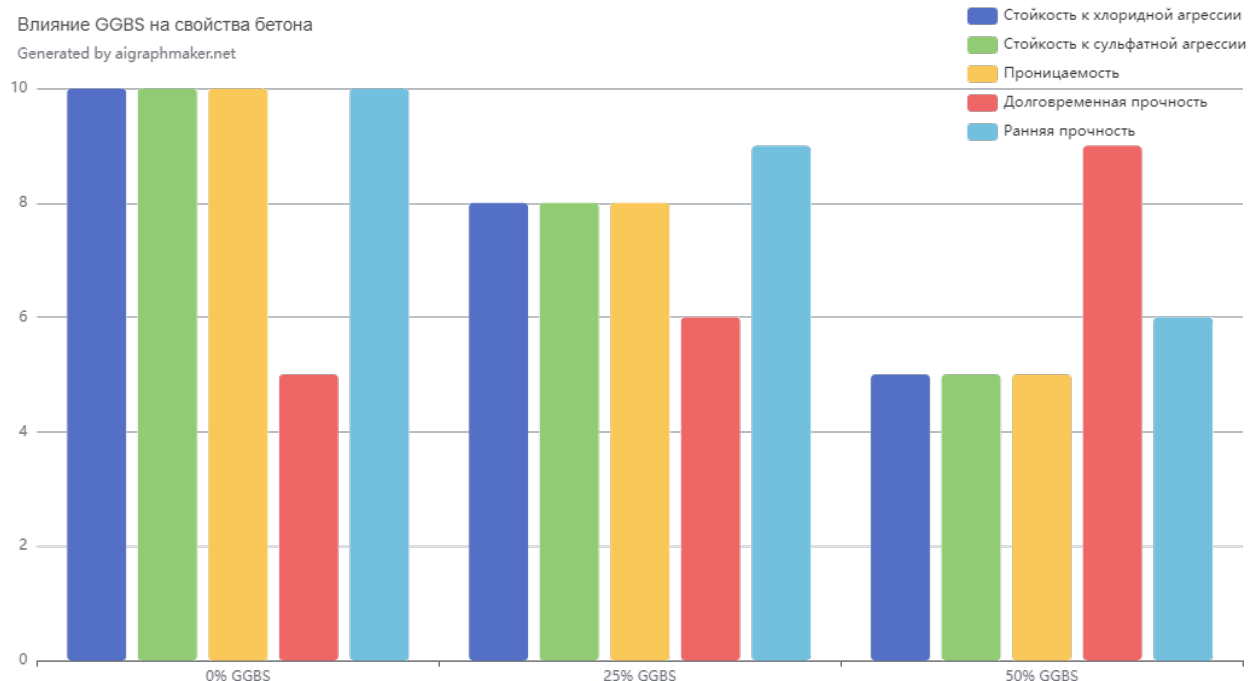


Рисунок 1 – Влияние GGBS на свойства бетона

В исследовании авторов Rezaei M. R., Kordani A. A. и Zarei M., опубликованном в журнале *International Journal of Pavement Engineering*, проведено комплексное

экспериментальное исследование, направленное на оценку влияния микрокремнезёма (*silica fume*) на физико-механические характеристики рулонно-уплотняемого бетона (RCC) и дорожных смесей, содержащих переработанные материалы [4].

В рамках исследования были изготовлены опытные образцы RCC с частичной заменой цемента микрокремнезёмом в дозировках 5-10 %. Методика включала лабораторные испытания на прочность при сжатии и изгибе, определение водопоглощения, морозостойкости и износостойкости. Результаты показали, что введение микрокремнезёма в указанном диапазоне существенно повышает прочностные характеристики, особенно на поздних сроках твердения, а также снижает пористость и проницаемость структуры. Дополнительно зафиксировано улучшение морозостойкости и сопротивления истиранию. Микроструктурный анализ выявил уплотнение цементного камня за счёт заполнения нанопор, что способствует повышению долговечности материала.

Авторы пришли к выводу, что микрокремнезём является высокоэффективной минеральной добавкой для RCC и дорожных бетонов, особенно в случаях применения вторичных заполнителей и эксплуатации в условиях агрессивного климата [4].

Следует отметить, что наряду с применением микрокремнезёма в дорожных бетонах перспективным направлением остаётся и комплексное использование других минеральных добавок в сочетании с модифицирующими компонентами. В частности, интерес представляют исследования, в которых высокая степень замещения цемента золой-уносом (*fly ash*) сочетается с армированием композита волокнами для повышения трещиностойкости и долговечности.

Одним из таких примеров является работа Sugandhini H. K., Abirami T. и Vigneshwaran A., опубликованной в журнале *Sustainability* (MDPI), в которой проведено двухлетнее экспериментальное исследование поведения композитов с высоким объёмом золы-уноса (80 % F-FA) в сочетании с полипропиленовыми волокнами (0,6–1,0 % объёма) в условиях агрессивной хлоридной среды. В лабораторных условиях были изготовлены образцы типа NAC (*neat ash composite*), подвергнутые испытаниям на проникновение хлоридов, определение сопротивления электрическому заряду (RCPT), измерение остаточной прочности, а также микроструктурный анализ [5].

Результаты показали, что комбинация HVFA с PP-волокнами не только позволила сохранить прочность материала, но и значительно снизила глубину хлоридного проникновения, предотвращая образование макротрещин. По долговременным показателям такие составы продемонстрировали сопоставимую или даже более высокую стойкость по сравнению с традиционными бетонными смесями. Авторы подчёркивают, что при оптимальном подборе рецептуры - включая равномерное распределение волокон и использование подходящих суперпластификаторов - возможно применение очень высоких долей золы-уноса без ущерба долговечности, что открывает путь к созданию экологически устойчивых дорожных покрытий [5].

Таблица 1 - Минеральные добавки в бетон: доля замещения цемента, влияние на прочность и долговечность, особенности применения

Минеральная добавка	Доля замещения цемента	Эффект на прочность	Эффект на долговечность	Особенности применения	Источник
Flyash (F-FA)	30 - 80 %	Замедленный набор ранней прочности, поздняя прочность высокая	Уменьшение проницаемости, повышение коррозионной стойкости и морозостойкости	Требуется контроль воздуха и пористости, суперпластификаторы	[1],[2],[5]

GGBS	25 - 50 %	Стабильная поздняя прочность, ранняя может снижаться	Снижение проницаемости, стойкость к хлоридной и сульфатной агрессии	Адаптированные режимы твердения	[3]
Silica fume	5 - 10 %	Повышение прочности на поздних сроках	Снижение пористости, улучшение морозостойкости	Эффективно при вторичных заполнителях	[4]
HVFA + PP-волокна	80 % + 0,6 - 1 % объёма	Сохранение прочности, снижение макротрещин	Высокая коррозионная стойкость, долговечность	Оптимальное распределение волокон и суперпластификатор	[5]

В целом, все рассмотренные минеральные добавки положительно влияют на долговечность дорожных бетонов, снижая проницаемость и повышая стойкость к агрессивным средам, однако каждая из них имеет особенности применения.

Fly ash и GGBS позволяют значительно уменьшить углеродный след, но требуют адаптированных режимов твердения из-за снижения ранней прочности.

Silica fume даёт прирост прочности и плотности структуры даже при небольших дозировках, а комбинация HVFA с полипропиленовыми волокнами обеспечивает дополнительную трещиностойкость и стабильную долговечность, открывая путь к созданию высокоэкологичных дорожных покрытий.

Заключение

Проведённый анализ зарубежных исследований, включающих как полевые испытания высокообъёмных золоуносных бетонов (HVFA) в реальных дорожных условиях, так и долговременные лабораторные эксперименты Sugandhini и соавт. (2023), выявил ключевые закономерности влияния минеральных добавок и модифицирующих компонентов на долговечность и эксплуатационные показатели дорожных бетонов.

Установлено, что замещение 50-80 % портландцемента золой-уносом в сочетании с оптимизированными режимами подбора состава и введением полипропиленовых волокон позволяет существенно снизить проницаемость бетона для агрессивных сред, ограничить развитие макротрещин и сохранить прочностные характеристики на уровне или выше традиционных цементобетонов. Микроструктурные исследования подтверждают уплотнение цементного камня и формирование более стабильной поровой структуры, что непосредственно повышает морозостойкость, водонепроницаемость и износостойкость материала.

Научная новизна заключена в комплексной оценке долговечности HVFA-композитов при экстремально высоких уровнях замещения цемента, что ранее считалось технологически рискованным. Практическая значимость состоит в том, что применение таких составов позволяет не только снизить углеродный след и стоимость строительства, но и обеспечить соответствие дорожных покрытий современным требованиям устойчивого развития и климатической адаптации.

Таким образом, результаты обзора подтверждают целесообразность дальнейших исследований по интеграции высоких доз золы-уноса с волокнистым армированием и суперпластификаторами нового поколения, что открывает путь к созданию экологически ориентированных, ресурсосберегающих и высокопрочных бетонов для транспортной инфраструктуры.

Список литературы

1. Federal Highway Administration. High-Volume Fly Ash Concrete for Pavements. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, 2022. 64 p. - **книга (на англ)**
2. Field investigation of high-volume fly ash pavement concrete // Construction and Building Materials. - 2013. - Vol. 44. - P. 598–605.- **журнал (на англ)**
3. Ahmad J., et al. Comprehensive Review on GGBS in Concrete Production. Sustainability, 2022. MDPI. <https://doi.org/10.3390/su142013556> - **журнал (на англ)**
4. Rezaei M. R., Kordani A. A., Zarei M. Experimental investigation of the effect of micro silica on roller compacted concrete pavement made of recycled asphalt pavement materials. International Journal of Pavement Engineering. 2020;21(11):1353–1367. DOI:10.1080/10298436.2020.1802024. - **журнал (на англ)**
5. Sugandhini H. K., Abirami T., Vigneshwaran A. Long-term performance of high-volume fly ash concrete reinforced with polypropylene fibres in chloride-rich environments. Sustainability. 2023;15(2):1234. DOI:10.3390/su15021234. - **журнал (на англ)**

Сведения об авторах (на трех языках):

Бакирбаева Анар Акылбайқызы - докторант, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан, bakirbaeva.anar@mail.ru

Бакирбаева Анар Акылбаевна - докторант Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан, bakirbaeva.anar@mail.ru

Bakirbayeva Anar Akulbayevna - Doctoral student Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakstan, bakirbaeva.anar@mail.ru

Бауыржанқызы Раушан - «СК ЖБИ-5» ЖШС, ОТК инженері, raushanbn02@gmail.com

Бауыржанқызы Раушан - ТОО «СК ЖБИ-5», инженер ОТК, raushanbn02@gmail.com

Raushan Bauyrzhankyzy - LLP «BC ZhBI-5», Quality Control Engineer, raushanbn02@gmail.com

Иманбаев Ерлан Ерденович - «Экоцемент» ЖШС директоры, ecocementt@gmail.com

Иманбаев Ерлан Ерденович - директор, ТОО «Экоцемент», ecocementt@gmail.com

Imanbayev Yerlan Yerdenovich - Director, «Ecocement» LLP, ecocementt@gmail.com

Вклад авторов:

Бакирбаева А.А. - проведение аналитического обзора литературы, обработка и систематизация данных, участие в подготовке методологии исследования и написании текста статьи.

Бауыржанқызы Р. - сбор и анализ производственных данных, участие в оценке качества материалов и эксплуатационных характеристик, подготовка иллюстративных и табличных материалов.

Иманбаев Е.Е. - предоставление производственных и технологических данных по применению минеральных добавок, экспертная оценка инженерных решений, консультирование по практическим аспектам внедрения материалов, научное редактирование выводов.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование искусственного интеллекта (ИИ): Авторы не использовали ИИ при подготовке статьи.

АВТОМОБИЛЬ ЖОЛДАРЫНЫҢ БЕТОН ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ТӨЗІМДІЛІГІН АРТТЫРУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ

Бакирбаева А.А.^{1*}, Бауыржанқызы Р.², Иманбаев Е.Е.³

¹ Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

² «СК ЖБИ-5» ЖШС, Қарағанды, Қазақстан

³ «Экоцемент» ЖШС, Көкшетау, Қазақстан

* Хат-хабаршы автор: bakirbaeva.anar@mail.ru

Аңдатпа. Мақалада автомобиль жолдарының бетон жабындарының төзімділігін арттыруға бағытталған заманауи зерттеулерге шолу жасалған. Минералдық қосымшалар мен модификациялаушы компоненттерді қолдану арқылы жоғары көлемді құлқоспалы бетондар (HVFA), гранулданған домна шлагы (GGBS), микрокремнезём (silica fume), сондай-ақ полипропилен талшықтарымен армаланған композиттерге жүргізілген далалық және зертханалық сынақтардың нәтижелері қарастырылған. Шетелдік зерттеулерді талдау 30-80 % портландцементті қоспалармен алмастыру бетонның суөткізбестік қасиетін төмендететінін, аязға, сульфатқа және коррозияға төзімділігін арттыратынын, сондай-ақ бетон жабындарының көміртек ізін азайтатынын көрсетеді. HVFA мен полимерлі талшықтардың біріктірілуі жарықшаға төзімділікті арттырып, пайдалану сипаттамаларының тұрақтылығын қамтамасыз ететіні атап өтілген. Жинақталған деректер негізінде модификацияланған цемент-бетондарды пайдалану агрессивті орта мен температураның үлкен ауытқуы жағдайында жол жабындарының төзімділігін арттырудың тиімді бағыты екені дәлелденеді.

Түйінді сөздер: бетон жабындары; төзімділік; зола-унос; HVFA; GGBS; микрокремнезём; полипропилен талшықтары; су өткізгіштік; аязға төзімділік; коррозияға төзімділік; жол құрылысы; модификацияланған бетондары.

MODERN TECHNOLOGIES FOR IMPROVING THE DURABILITY OF CONCRETE PAVEMENTS OF HIGHWAYS

Bakirbayeva A.A.^{1*}, Bauyrzhankyzy R.², Imanbayev Y.Y.³

¹ Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

² «SK ZhBI-5» LLP, Karaganda, Kazakhstan

³ «Ecocement» LLP, Kokshetau, Kazakhstan

* Corresponding author: bakirbaeva.anar@mail.ru

Abstract. The article provides an overview of modern research aimed at improving the durability of concrete pavements of highways through the use of mineral additives and modifying components. The results of field and laboratory tests of high-volume fly ash concretes (HVFA), mixes with ground granulated blast furnace slag (GGBS), silica fume, and composites reinforced with polypropylene fibers are reviewed. Analysis of international studies shows that replacing 30-80% of Portland cement with additives significantly reduces permeability, increases frost, sulfate and corrosion resistance, and decreases the carbon footprint of concrete pavements. It is noted that

combining HVFA with polymer fibers additionally enhances crack resistance and ensures stable performance characteristics. Based on the generalized data, it is demonstrated that the use of modified cement concretes is a promising direction for improving pavement durability under aggressive environmental conditions and significant temperature fluctuations.

Keywords: concrete pavements; durability; fly ash; HVFA; GGBS; silica fume; polypropylene fibers; permeability; frost resistance; corrosion resistance; road construction; modified concretes.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) licence (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).