



ПРИМЕНЕНИЕ ЗОЛЫ-УНОСА И ДРУГИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ

https://orcid.org/0009-0008-3998-3100 **Ожауқан Н.Т.^{1*}, Жылкышбаева Н.Б.², Алшинбаева А.М.²**

¹*НАО «Л.Н.Гумилев атындағы Евразийский национальный университет», Астана,
Казахстан

²АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана,
Казахстан

*Корреспондент автор: purcatt@gmail.com

Аннотация. В статье представлен обзор современных технологий строительства цементобетонных автомобильных дорог в контексте повышения долговечности, экологической устойчивости и экономической эффективности транспортной инфраструктуры. Проанализированы мировые тенденции применения бетонных покрытий в странах с различными климатическими условиями, а также возможности их внедрения в Республике Казахстан и Центральной Азии. Особое внимание уделено использованию минеральных добавок и промышленных отходов (зола-унос, доменный шлак, микрокремнезём, стеклобой) для модификации цементобетонных смесей. Рассмотрены результаты исследований влияния добавок на прочность, водопоглощение, морозостойкость и трещиностойкость бетона. Обобщён зарубежный опыт применения монолитных, сборных и армированных бетонных покрытий, включая технологии CRCP, RCC и whitetopping. Показано, что применение модифицированных бетонных покрытий позволяет увеличить срок службы дорог до 30-50 лет и снизить эксплуатационные затраты до 30-40 %. Выявлены перспективы применения данных технологий для условий Казахстана с учётом климатических и эксплуатационных особенностей.

Ключевые слова: бетонные покрытия, цементобетон, долговечность, модифицированные бетоны, зола-унос, доменный шлак, микрокремнезём, стеклобой, промышленные отходы, устойчивое строительство, дорожные материалы, CRCP, RCC, whitetopping, морозостойкость, прочность, водопоглощение, транспортная инфраструктура.

Введение

Развитие транспортной инфраструктуры является одним из ключевых факторов экономического роста и социальной стабильности государства. В условиях растущих нагрузок на дорожные покрытия, вызванных увеличением интенсивности движения тяжёлого автотранспорта, возрастают требования к долговечности, надёжности и экономической эффективности автомобильных дорог. В этом контексте бетонные покрытия вновь привлекают внимание как альтернатива традиционному асфальтобетону, благодаря их высокой прочности, устойчивости к климатическим воздействиям и низким эксплуатационным затратам.

В мировой практике (США, Германия, Китай, Нидерланды) бетонные дороги широко применяются в магистральном и промышленном строительстве. По данным Федерального управления автомобильных дорог США (FHWA), срок службы бетонного покрытия при

правильной эксплуатации может достигать 30-40 лет, что почти в два раза превышает срок службы асфальтобетонных аналогов. При этом суммарные жизненные затраты (*life-cycle cost*) на бетонные дороги оказываются ниже за счёт редких ремонтов и меньших затрат на содержание [1].

Актуальность применения цементобетонных покрытий в Республике Казахстан и странах Центральной Азии обусловлена сочетанием факторов: резкие температурные перепады, высокий уровень ультрафиолетового излучения, а также интенсивная эксплуатация транспортной сети в условиях транзитных грузоперевозок по международным коридорам. Применение традиционного асфальтобетона в таких условиях приводит к ускоренной колеообразованию, трещинообразованию и выкрашиванию, что требует частых ремонтов и увеличивает эксплуатационные затраты.

Методология

В последние годы значительное внимание уделяется модификации бетонных смесей с использованием промышленных и энергетических отходов - золы-уноса, доменного шлака, микрокремнезёма и т.д. Такая технология позволяет не только улучшить прочностные и деформационные характеристики бетона, но и снизить углеродный след строительства, что соответствует целям устойчивого развития (SDGs) и международным климатическим соглашениям (Парижское соглашение, 2015). Например, исследования в Польше (Kozłowski et al., 2021) показали, что замена 20-30 % портландцемента золой-уносом снижает тепловыделение при твердении, повышает стойкость к воздействию солей и морозу, а также уменьшает выбросы CO₂ на 15-20 % [2].

Кроме того, современное проектирование бетонных дорог невозможно без учёта механики взаимодействия колёс транспортных средств и покрытия, оптимизации толщины плит и швов, внедрения методов непрерывного армирования (CRCP – continuously reinforced concrete pavement) и использования высокопрочных цементных композиций. В ряде стран (Канада, Южная Корея) уже внедрены гибридные конструкции с тонким слоем асфальта поверх бетона (whitetopping), что позволяет сочетать преимущества обеих технологий.

Таким образом, в условиях увеличения интенсивности движения, климатических вызовов и необходимости снижения экологического воздействия, бетонные дороги представляют собой перспективное направление развития дорожного строительства. Цель данного обзора — проанализировать современные тенденции, инновационные материалы и технологические решения в области строительства бетонных автомобильных дорог, с акцентом на зарубежный опыт и возможности применения в Казахстане.

В последние десятилетия в ряде стран проведены масштабные исследования, направленные на оптимизацию состава цементобетона для дорожных покрытий с использованием промышленных отходов. Эти работы имеют выраженную прикладную направленность, так как связаны не только с повышением долговечности дорожных конструкций, но и с решением задач экологической безопасности.

Зола-унос (fly ash), образующаяся при сжигании угля на тепловых электростанциях, активно применяется в дорожном строительстве в США, Китае, Индии, Австралии и странах ЕС. Исследования показывают, что частичная замена портландцемента золой-унос в количестве 15-30 % позволяет:

- снизить тепловыделение при твердении;
- уменьшить усадочные деформации;
- повысить долговечность в условиях циклического замораживания и оттаивания;
- улучшить рабочую удобоукладываемость смеси за счёт сферической формы частиц.

В США, согласно данным Federal Highway Administration (FHWA), ежегодно в дорожном строительстве используется до 12 млн тонн золы-уноса, при этом доля её применения в бетонных покрытиях составляет около 50 % от общего объёма.

Доменные и сталеплавильные шлаки обладают латентной гидравлической активностью и в присутствии щелочных активаторов способны формировать прочную структуру цементного камня. В Германии и Японии применение гранулированного доменного шлака в количестве 25-40 % от массы цемента позволяет повысить стойкость бетона к сульфатной коррозии и агрессивным средам, что особенно важно при устройстве дорог в прибрежных зонах [3].

В Канаде и Австралии тонкомолотый стеклобой используется как пущолановая добавка и как частичная замена кварцевого песка в дорожных бетонах. Применение 10-20 % стеклобоя улучшает микроструктуру за счёт формирования дополнительного геля С–S–Н, а также снижает пористость.

Таблица 1 - Применение промышленных отходов в цементобетонных дорожных покрытиях в разных странах

Страна	Вид отхода	Доля замены вяжущего, %	Основные эффекты применения	Источник
США	Зола-унос	15-30	Увеличение долговечности, снижение тепловыделения	FHWA, 2021
Германия	Шлак	25-40	Устойчивость к сульфатной коррозии, повышение морозостойкости	Müller et al., 2020
Япония	Шлак	20-35	Повышение трещиностойкости и прочности на изгиб	Tanaka et al., 2019
Канада	Стеклобой	10-20	Снижение пористости, улучшение структуры	Shao et al., 2020
Австралия	Зола-унос, стеклобой	15-25	Повышение износостойкости, уменьшение усадки	Thomas et al., 2021

Результаты и Обсуждение

Графические данные по изменению прочности и водопоглощения при замене цемента золой-унос и шлаками показывают, что оптимальная степень замещения варьирует в пределах 15-30 %, при этом рост долговечности может достигать 40-50 % по сравнению с контрольными составами [4]. На рисунке 1 показан оптимальный диапазон 15-20 % для максимальной прочности и минимального водопоглощения.

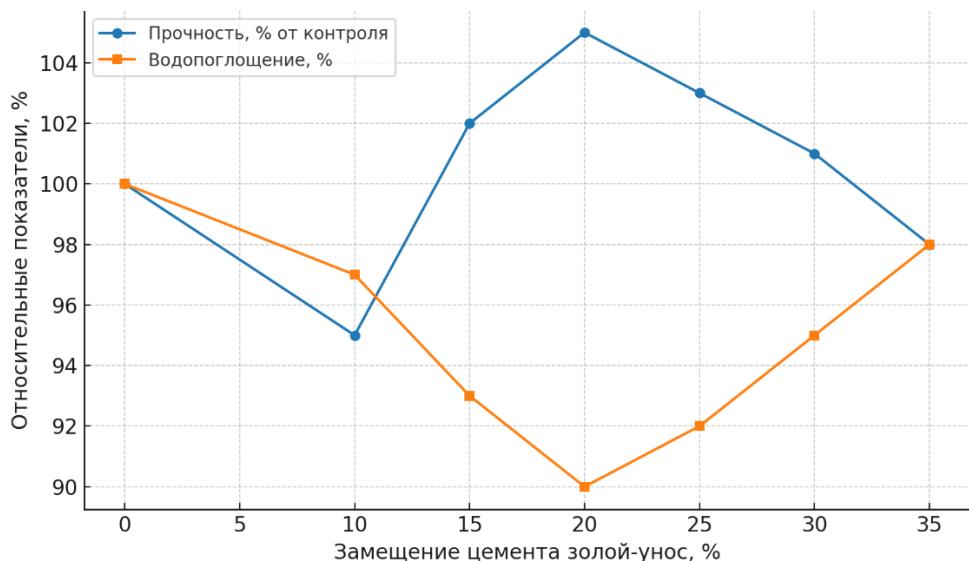


Рисунок 1 - Влияние замещения цемента золой-унос на прочность и водопоглощение

В последние годы в мировой и отечественной практике строительства автомобильных дорог наблюдается значительный интерес к применению цементобетонных покрытий. Данный тип покрытия демонстрирует высокую износостойкость, долговечность и устойчивость к неблагоприятным климатическим условиям, что особенно актуально для регионов с резкими температурными колебаниями и высокими нагрузками на транспортную инфраструктуру.

Традиционная технология устройства бетонных дорог предполагает укладку монолитного цементобетонного слоя толщиной 22-28 см на подготовленное основание. Бетон уплотняется с помощью виброруса или бетоноукладчика, после чего производится резка температурных швов и их герметизация. В мировой практике, в частности в США и Германии, особое внимание уделяется качеству исходных материалов: применяются высокомарочные цементы (CEM I 42,5 и выше), щебень с высоким модулем упругости и модифицирующие добавки, снижающие усадочные деформации.

В условиях необходимости ускоренного ввода дороги в эксплуатацию применяются сборные железобетонные плиты заводского изготовления. Их монтаж возможен за 2–3 дня на участке в несколько километров, что критически важно для ремонта магистралей с высокой транспортной нагрузкой. Однако такие покрытия требуют высокоточной геометрии основания и сложных технологийстыковки плит.

В Японии и Южной Корее подобная технология активно используется в мегаполисах, где даже кратковременная остановка движения ведёт к значительным экономическим потерям.

Для повышения прочности и трещиностойкости покрытия применяются различные виды армирования – от стальной сетки до дисперсной стальной и полимерной фибры. Исследования показывают, что введение 0,5-1,0 % полипропиленовой фибры значительно снижает развитие микротрещин на ранних стадиях твердения бетона, что увеличивает срок службы покрытия до 30-40 лет [6]. На рисунке 2 мы можем увидеть значительное снижение микротрещин при 0,5-1 % фибры.

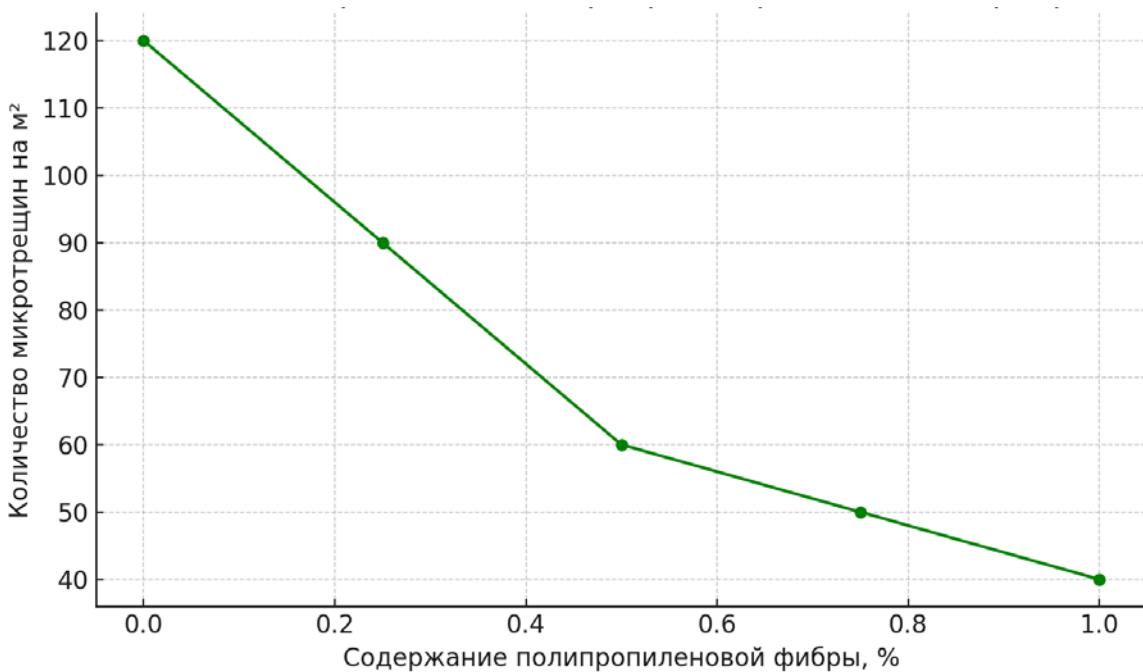


Рисунок 2 - Влияние полипропиленовой фибры на развитие микротрещин

RCC - это технология, в которой используется жёсткая бетонная смесь с низким водоцементным отношением. Смесь укладывается слоями и уплотняется дорожными катками, что ускоряет процесс строительства и снижает себестоимость. Такой подход получил широкое распространение в Канаде и Австралии для строительства дорог в промышленных зонах.

Применение цементобетонных покрытий в дорожном строительстве имеет ряд технологических, экономических и эксплуатационных преимуществ, которые обуславливают растущий интерес к этому виду дорожных конструкций в мире.

Срок службы бетонных дорог в среднем составляет 20-40 лет без капитального ремонта, что значительно превышает аналогичный показатель для асфальтобетонных покрытий (обычно 8-12 лет). Например, в Германии бетонные участки автобанов, построенные в 1980-х годах, до сих пор находятся в эксплуатации с минимальными ремонтами, при этом выдерживая интенсивное движение грузового транспорта [7].

Бетон обладает модулем упругости 25-35 ГПа, что обеспечивает равномерное распределение нагрузок на основание. Это особенно важно на дорогах с тяжёлым транспортом (фуры, автобусы), где асфальт склонен к колеообразованию. В Канаде исследования показали, что бетонные покрытия сохраняют ровность профиля даже при нагрузках свыше 11,5 тонн на ось [8].

Бетонные дороги менее подвержены термопластическим деформациям летом и трещинообразованию зимой, особенно при применении морозостойких цементов и воздушноволекающих добавок.

В Казахстане и России уже есть успешные pilotные проекты бетонных трасс, которые показали, что покрытие сохраняет эксплуатационные характеристики при температурных колебаниях от -40°C до $+40^\circ\text{C}$.

Хотя первоначальная стоимость устройства бетонной дороги на 20-40 % выше, чем асфальтовой, затраты на ремонт и содержание за весь срок службы оказываются на 30-50 % ниже. По данным Федерального управления автомобильных дорог США (FHWA), суммарные эксплуатационные расходы на бетонные покрытия за 30 лет в среднем на 37 % меньше, чем на асфальтобетонные.

Экологические преимущества:

-Возможность применения промышленных отходов (зола-унос, шлаки, микрокремнезём) в составе бетонной смеси.

-Отсутствие нефтепродуктов в составе, что снижает выбросы ЛОС (летучих органических соединений).

-Более высокий коэффициент отражения солнечного света, что снижает эффект городского теплового острова.

Бетон имеет светлую поверхность, что улучшает видимость в ночное время. Кроме того, современные технологии текстурирования позволяют создавать поверхность с высоким коэффициентом сцепления, уменьшая риск аквапланирования.

Заключение

Развитие технологий строительства бетонных автомобильных дорог отражает общую тенденцию к повышению долговечности, экологической устойчивости и экономической эффективности транспортной инфраструктуры. Проведённый обзор современных научных исследований и практических решений показал, что ключевыми направлениями совершенствования остаются:

1. Модификация состава бетона - применение минеральных добавок (зола-уноса, шлаки, микрокремнезём) и полимерных компонентов позволяет не только улучшить прочностные и морозостойкие характеристики, но и снизить углеродный след производства.

2. Использование вторичных ресурсов - переработанные строительные отходы и промышленные побочные продукты способствуют формированию замкнутого цикла материалов, что соответствует принципам «зелёного» строительства.

3. Инновационные методы укладки и ухода - внедрение автоматизированных систем контроля качества, лазерного нивелирования и ускоренного твердения повышает производительность и надёжность дорожного покрытия.

4. Долговечность и эксплуатационные характеристики - исследования показывают, что правильно спроектированные и построенные бетонные дороги способны служить 30–50 лет при минимальном ремонте, что оправдывает их более высокую начальную стоимость по сравнению с асфальтовыми покрытиями [9, 10].

Таким образом, бетонные автомобильные дороги остаются стратегически важным направлением развития транспортной сети, особенно в условиях возрастающих нагрузок, климатических вызовов и необходимости снижения эксплуатационных затрат. Их дальнейшее совершенствование возможно при комплексном подходе, включающем как инновационные материалы, так и передовые методы строительства и управления жизненным циклом дорожных сооружений.

Список литературы

1. Malhotra, V.M., Mehta, P.K. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., 2002. - **книга (на англ)**
2. Thomas, M. Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete. Portland Cement Association, 2007. - **книга (на англ)**
3. Hemalatha, T., Ramaswamy, A. A review on fly ash characteristics - Towards promoting high volume utilization in developing sustainable concrete. Journal of Cleaner Production, 2017. - **журнал (на англ)**
4. Siddique, R. Utilization of industrial by-products in concrete. Procedia Engineering, 2012. - **журнал (на англ)**
5. Naik, T.R., Kraus, R.N. The role of fly ash in concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003. - **журнал (на англ)**
6. ASTM C618 – Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. - **стандарт (на англ)**

7. Huang, B., Shu, X., Burdette, E.G. Mechanical properties of asphalt mixtures containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 2009. - **журнал (на англ)**
8. Sear, L.K.A. *Properties and Use of Coal Fly Ash: A Valuable Industrial By-Product*. Thomas Telford Publishing, 2001. - **книга (на англ)**
9. FHWA. *Fly Ash Facts for Highway Engineers*. Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 2021. - **электронный ресурс (на англ)**
10. EN 450-1: Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria. - **стандарт (на англ)**

Сведения об авторах (на трех языках):

Ожауқан Нұрсәт Талғатұлы - 2-ші курс студенті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті КЕАҚ, Астана, Қазақстан, nypcatt@gmail.com

Ожауқан Нұрсат Талғатович - студент 2 курса, НАО «Евразийский Национальный Университет им Л.Н.Гумилева», Астана, Казахстан, nypcatt@gmail.com

Ozhaukan Nursat Talgatuly – 2 year student, NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan, nypcatt@gmail.com

Алшинбаева Ақмарал Мақсатқызы - АҚ «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» сынақ зертханасының менгерушісі, Астана, Қазақстан, alshinbayeva@qazjolgzi.kz

Алшинбаева Ақмарал Максатовна - Заведующая испытательной лаборатории АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан, a.alshinbayeva@qazjolgzi.kz

Alshinbayeva Akmaral Maksatovna - Head of Testing Laboratory, JSC «Kazakhstan Road Research Institute», Astana, Kazakhstan, a.alshinbayeva@qazjolgzi.kz

Жылқышбаева Назым Болатқызы - АҚ «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты» сынақ зертханасының жетекші инженері, Астана, Қазақстан, n.zhylkyshbaeva@qazjolgzi.kz

Жылқышбаева Назым Болатовна - Ведущий инженер испытательная лаборатории АО «Казахстанский дорожный научно-исследовательский институт», Астана, Казахстан, n.zhylkyshbaeva@qazjolgzi.kz

Zhylykshbayeva Nazym Bolatovna - Senior Engineer of Testing Laboratory, JSC «Kazakhstan Road Research Institute», Astana, Kazakhstan, n.zhylkyshbaeva@qazjolgzi.kz

Вклад авторов:

Ожауқан Н.Т. - постановка цели и задач исследования, разработка методологии, анализ литературных источников, подготовка первоначального текста статьи и оформление результатов исследования.

Жылқышбаева Н.Б. - сбор и систематизация экспериментальных данных, проведение испытаний, анализ результатов лабораторных исследований, подготовка графиков, таблиц и иллюстраций.

Алшинбаева А.М. - руководство лабораторными работами, контроль качества экспериментов, консультации по технологическим аспектам, проверка достоверности данных и редактирование текста статьи.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

ҰНТАҚТЫ КӨМІР ҚҮРҒАТЫСЫ ЖӘНЕ БАСҚА ӨНДІРІСТІК ҚАЛДЫҚТАРДЫ ПАЙДАЛАНУ

<https://orcid.org/0009-0008-3998-3100>  Н. Т. Ожауқан^{1*}, Н.Б. Жылкышбаева²,
А.М. Алшинбайева²

¹ КЕАҚ «Л.Н.Гумилев атындағы Еуразиялық Ұлттық Университет» Астана, Қазақстан

² АҚ «Қазақстан жол ғылыми-зерттеу институты», Астана, Қазақстан
*Байланыс авторы: nypcatt@gmail.com

Аннотация. Мақалада цемент-бетон автомобиль жолдарын салудың заманауи технологиялары қарастырылып, көлік инфрақұрылымының беріктігін, экологиялық тұрақтылығын және экономикалық тиімділігін арттыру мәселелері талданған. Әртүрлі климаттық жағдайлары бар елдерде бетон жабындарды қолдану жаһандық тенденциялары зерттеліп, Қазақстан Республикасы мен Орталық Азияда олардың енгізу мүмкіндіктері қарастырылған. Минералдық қоспалар мен өндірістік қалдықтарды (ұнтақты көмір құлін, домна шлактарын, микрокұмды, сынық шыныны) цемент-бетон қоспаларын модификациялау үшін қолдануға ерекше назар аударылған. Қоспалардың бетонның беріктігіне, су сініруіне, аязға тәзімділігіне және жарыққа тәзімділігіне әсері зерттелген нәтижелер қарастырылған. Монолиттік, зауыттық және арматураланған бетон жабындарын, соның ішінде CRCP, RCC және whitetopping технологияларын қолдану бойынша шетелдік тәжірибе сарапланған. Модификацияланған бетон жабындарын қолдану жолдардың қызмет мерзімін 30-50 жылға дейін ұзартуға және эксплуатациялық шығындарды 30-40 %-ға азайтуға мүмкіндік беретіні көрсетілген. Қазақстан жағдайында климаттық және эксплуатациялық ерекшеліктерді ескере отырып, осы технологияларды қолдану перспективалары анықталған.

Түйінді сөздер: бетон жабындар, цемент-бетон, беріктік, модификацияланған бетондар, ұнтақты көмір құлі, домна шлакы, микрокұм, сынық шыны, өндірістік қалдықтар, тұрақты құрылым, жол материалдары, CRCP, RCC, whitetopping, аязға тәзімділік, беріктік, су сініру, көлік инфрақұрылымы

APPLICATION OF FLY ASH AND OTHER INDUSTRIAL WASTES IN PRODUCTION

<https://orcid.org/0009-0008-3998-3100>  N.T. Ozhaukan^{1*}, N.B. Zhylykshbayeva², A.M. Alshinbayeva²

¹ NJSC «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana, Kazakhstan

² JSC «Kazakhstan Road Research Institute», Astana, Kazakhstan
*Corresponding author: nypcatt@gmail.com

Abstract. This article presents a review of modern technologies for constructing cement concrete roads, focusing on increasing durability, environmental sustainability, and economic efficiency of transport infrastructure. Global trends in the use of concrete pavements in countries with various climatic conditions are analyzed, as well as the possibilities for their implementation in the Republic of Kazakhstan and Central Asia. Special attention is given to the use of mineral additives and industrial wastes (fly ash, blast furnace slag, microsilica, crushed glass) for modifying cement concrete mixtures. The results of studies on the effects of these additives on strength, water absorption, frost resistance, and crack resistance of concrete are reviewed. Foreign experience in the use of monolithic, precast, and reinforced concrete pavements, including CRCP,

RCC, and whitetopping technologies, is summarized. It is shown that the use of modified concrete pavements can extend the service life of roads to 30–50 years and reduce operating costs by 30–40 %. Prospects for the application of these technologies under the conditions of Kazakhstan, taking into account climatic and operational features, are identified.

Keywords: concrete pavements, cement concrete, durability, modified concretes, fly ash, blast furnace slag, microsilica, crushed glass, industrial wastes, sustainable construction, road materials, CRCP, RCC, whitetopping, frost resistance, strength, water absorption, transport infrastructure



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/>).