



САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ С КОЛЛОИДНОЙ СТРУКТУРОЙ УПРОЧНЕНИЯ – БУДУЩЕЕ ЭКОЛОГИЧНЫХ И ДОЛГОВЕЧНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Б.А. Асматулаев ^{1*}, Р.Б. Асматулаев ¹, Н.Б. Асматулаев ¹

¹Научно-исследовательская и производственная компания «Каздоринновация», г. Алматы,
Республика Казахстан

*Корреспондент автор: boris-aisa@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты фундаментальных лазерных и экспериментальных исследований, а также многолетнего мониторинга автомобильных дорог, построенных из бетона на основе белитовых дорожных цементов. Для экологичного производства белитовых цементов используются крупнотоннажные техногенные минеральные отходы (ТМО) — шлаки и золы от переработки руд и угля, которые при оптимальной механо-химической активации проявляют уникальные вяжущие свойства. Утилизация более 60 млрд тонн накопленных ТМО рассматривается в рамках «Зелёной экономики» Казахстана как стратегическое направление устойчивого развития.

Белитовые цементы, содержащие до 80 % двухкальциевого силиката (C_2S), обеспечивают долговечность дорожных покрытий сроком эксплуатации свыше 50 лет. Лазерные исследования выявили коллоидную структуру гидросиликатов кальция ($C-S-H$), обеспечивающую самовосстановление и упрочнение бетона под действием транспортных и температурных нагрузок. Практические наблюдения подтверждают, что упрочнение таких бетонов продолжается десятилетиями. Научная новизна работ заключается в экспериментальном подтверждении теории коллоидного упрочнения В. Михаэлиса, выдвинутой 180 лет назад.

Ключевые слова: автомобильные дороги, фундаментальные исследования, экологичные белитовые цементы, коллоидные структуры, тиксотропия и реопексия, долговечность.

Введение

Белитовые цементы, с преобладающим содержанием ТМО, состоящих из двухкальциевого силиката (до 50 - 80 % C_2S - белит), обеспечивают высокую технологичность при круглогодичном строительстве и долговечность дорожного бетона при эксплуатации автодорог сроком не менее 50 лет. Лазерные исследования позволили изучить структуру цементного камня на основе белитового цемента (содержание C_2S -белит до 50 – 80 %), формируемого коллоидными новообразованиями наноразмерного уровня — гидросиликатами кальция $C-S-H$, способствующими практически полной гидратации цементных зерен. В сопоставлении с традиционным алитовым портландцементом (содержание C_3S - алит до 65 %), обреченным на разрушение в условиях эксплуатации автодорог, поэтому в мире межремонтные сроки цементобетонных покрытий ограничиваются до 25-30 лет. Результатами исследований и практикой установлено, что коллоидные структуры обладают следующими уникальными свойствами: длительная тиксотропия (самовосстанавливание при возможном разрушении) и длительная реопексия (упрочнение под действием транспортных нагрузок и сезонных температурных колебаний),

исключительно в условиях эксплуатации автодорог. Мониторинг автодорог, построенных из бетонов на различных белитовых цементах, подтверждает, что упрочнение бетонов продолжается уже почти 50 лет. Впервые в Казахстане подтверждена научная новизна и эффективность теории упрочнения минеральных вяжущих с преобладанием коллоидных структур, предложенной ученым В. Михаэлисом ровно 180 лет назад, но до сих пор не имевшей практического и теоретического подтверждения. Новизна разработок подтверждена рядом патентов на изобретения Республики Казахстан. Считается, что найден секрет древнего долговечного римского бетона, освоенного на применении вулканических туфов и расплавов.

1. Актуальность разработки

В начале XXI века мировыми концепциями «вечных дорог» США и «долговечных дорог» стран Европейского Союза выдвинуты новые требования к межремонтным срокам службы дорожных конструкций в связи с ростом транспортных нагрузок в 2–3 раза. Современными требованиями установлено, что затраты на строительство и содержание дорог окупаются при сроках эксплуатации не менее 50 лет, без необходимости ремонта. В Казахстане разработаны и освоены монолитные дорожные бетоны на основе белитовых цементов и вяжущих, полученных на основе ТМО, которые обеспечивают самозалечивание бетона и не деформируются, а от действия вызванных транспортными и климатическими нагрузками, упрочняются быстрее. Для экологичного производства белитовых цементов (без обжига) используются промышленные крупнотоннажные техногенные минеральные отходы (ТМО) — шлаки от переработки металл и фосфор содержащих руд, а также золы от сжигания угля на 39 ТЭЦ Казахстана, которые прошли термическую обработку и при оптимальной механо - химической активизации обладают уникальными вяжущими свойствами. Утилизация более 60 млрд тонн накопленных крупно тоннажных отходов - ТМО, в Казахстане с ежегодным приростом до 1 млрд тонн, является приоритетом в рамках закона Казахстана «Зелёная экономика».

2. Научные лазерные исследования дорожного бетона с коллоидной структурой многолетнего упрочнения.

Бетон - наиболее распространённый строительный материал, являющийся наноструктурированным многокомпонентным композитом, включающим аморфную фазу, кристаллы нано- и микрометрового уровня и связанную воду. Фундаментальными Физико-химические исследования установили, что в структуре белитового цементного камня основным клеевым компонентом в структуре цементного камня являются коллоидные гидросиликаты кальция типа C-S-H, в отличие от кристаллических новообразований в алитовых портландцементных, которые не обладают свойствами самовосстановления при разрушениях.

Результаты рентгенографического анализов показали, что при различных температурах твердения фаза новообразований сохраняется, а снижение температуры замедляет гидратацию цемента. Электронная микроскопия подтверждает наличие развитых волокнистых C-S-H структур в белитовом цементе спустя 90 и 180 суток твердения, в отличие от кристаллического строения портландцемента.

Прочностные испытания показывают, что при понижении температуры твердение замедляется, но последующий прирост прочности сохраняется.

Данные приведенные на рис.1 свидетельствуют, что низкие положительные и отрицательные температуры замедляют процесс твердения цемента, предварительно выдержанного в нормальных условиях. При этом, чем ниже температура твердения, тем медленнее происходит набор прочности.

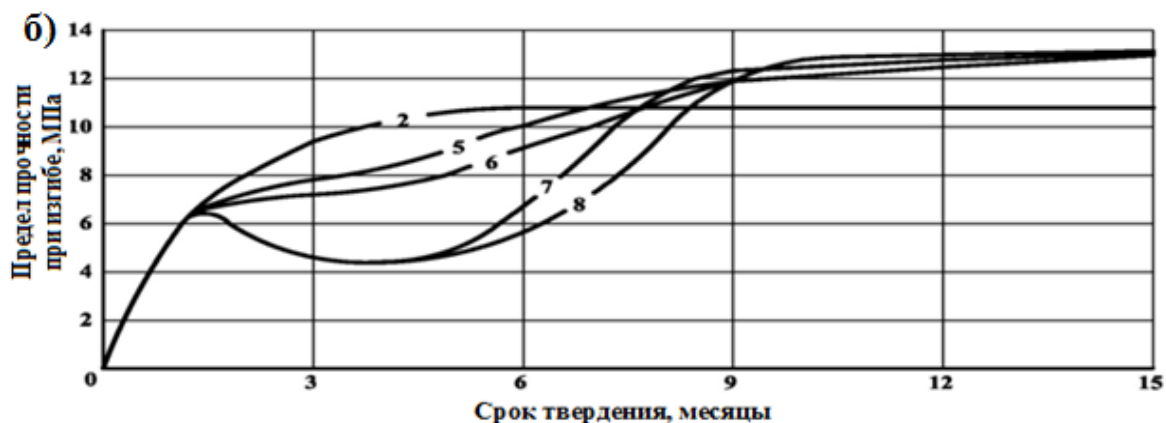


Рисунок 1 – Кинетика изменения прочности образцов белитового цементного камня во времени: 2 – постоянно в нормальных условиях; 5,6,7,8 – предварительно выдержанных 1 месяц при нормальных условиях, затем соответственно при +5 °С; 0 °С; -5 °С, -10 °С, затем опять в нормальных условиях: *a* – прочность на сжатие; *б* – прочность на растяжение при изгибе.

3. Долговечность бетонных покрытий дорог

Долговечность дорожных покрытий на белитовом цементе подтверждаются результатами испытаний и мониторинга дорог, построенных в 1976–1984 гг. (рисунок 2.). Упрочнение бетона продолжается более 35–49 лет.



Рисунок 2 – Кинетика нарастания прочности дорожных покрытий из самовосстанавливающегося дорожного бетона на основе ТМО. Где: 1-зола ТЭЦ, 2-бокситовый шлам, 3- гранулированный шлак (доменный или фосфорный)

Таблица 1 – Сопоставление показателей: традиционного цементобетона и самовосстанавливающегося дорожного бетона на основе белитового цемента из ТМО

Состав дорожного бетона, мас. %				Пределы прочности в возрасте 180 сут, МПа (среднее значение из 3-х)			Модуль упругости E_y , МПа
Щебень фракций, мм:		Песок $M_{кр} = 2,5$	Цемент, %	$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{изг}/R_{сж}$	
5-10	10-20						
15	34	29	Белитовый цемент, 15%	30,9	5,9	0,19	30000

15	34	29	Алитовый цемент, М400,15%	30,0	4,5	0,15	35000
----	----	----	---------------------------	------	-----	------	-------

Высокие деформативные свойства медленно твердеющего бетона свидетельствуют о высокой дисперсности и прочности на растяжение коллоидной структуры цементного камня белитовых цементов.

В таблице 2, представлены результаты испытания кернов, высверленных из бетона автодороги «Фоголевка – Жданово», построенной в декабре 1977 года и испытанных через 12 лет и 28 лет и эта дорога находится в идеальном состоянии до настоящего времени..

Таблица 2 – Результаты испытания кернов из бетонного покрытия автодороги «Фоголевка – Жданово» республиканского значения

Наименование измеряемого показателя	Испытание кернов 1989 г., МПа, (возраст бетона 12 лет)	Испытание кернов 2005 г., МПа, (возраст бетона 28 лет)
Предел прочности при сжатии	36,4; 36,7; 36,5 Среднее 36,5 (М 350)	48,6; 49,0; 48,8 Среднее 48,8 (М 450)
Предел прочности при изгибе	-	8,6; 8,3

Заключение

Установлено из опыта Казахстана и мировой практики, что цементобетонные покрытия на основе портландцемента с преобладанием до 65% трех кальцевого гидросиликата - C3S, имеют ограниченный срок службы (до 25–30 лет). Из химии цементов установлено [7], что C3S обречен на разрушение по закономерностям физико-химических процессов, в условиях эксплуатации дорог, подвергающихся динамическим транспортным нагрузкам и сезонным изменениям температуры и влажности бетона. Впервые в мировой практике в Казахстане установлено, что дорожные бетоны на основе белитовых цементов с преобладанием C2S - белита до 50 - 80%, обладают свойством коллоидной структурой упрочнения, что обеспечивает гидратацию цемента практически полностью, что и обеспечивает долговечность бетона в течение эксплуатации дорог не менее 50 лет. Это подтверждает актуальность и научную новизну, установленную и подтвержденную впервые учеными в Казахстане, по выдвинутой теории видным ученым В. Михаэлисом, предложенную 180 лет назад, но не имевшей практического и теоретического подтверждения до настоящего времени. Так как коллоидная структура может быть осуществима только для условий применения жестких цементных смесей и, желательно при действии динамических нагрузок, способствующих углублению гидратации белитовых цементов до полной гидратации всех зерен цемента. Самовосстанавливающиеся дорожные бетоны и колееустойчивые асфальтобетоны на основе белитовых цементов и наноструктурирующих асфальтовых вяжущих проявляют свои уникальные эксплуатационные свойства исключительно в условиях многолетней эксплуатации автомобильных дорог. Нами установлено испытаниями бетонных и асфальтовых кернов, высверленных с дорог различного возраста эксплуатации —многолетнее упрочнение под действием постоянных много циклических вибрационных транспортных нагрузок, а также сезонных изменений температур и влажности дорожных конструкций, находящихся в эксплуатации. После 39 лет эксплуатации дороги бетон достигает прочности М450 - 480, а на растяжение при изгибе до 9 МПа, что в 2 раза выше традиционного цементобетона М500.

Список использованной литературы

1. Радовский Б. С. Концепция вечных дорожных одежд. Дорожная техника. – 2011. – С. 120–132.
2. Асмагулаев Б.А. Монография «Строительство дорожных одежд с повторным использованием материалов реконструируемых дорог». Алматы: Эверо, 1999. – 212 с.
3. Асмагулаев Б.А. и др. Монография «Нанотехнологии XXI века для долговечных автомобильных дорог Казахстана». Алматы: ТОО «Бук эксперт Казахстан», 2024.-348с.
4. Асмагулаев Б.А. и др. Укатанный бетон на шлаковом вяжущем. Жур.Автомобильные дороги, №9, 1993, с.18-20.
5. Асмагулаев Б.А. Прочность шлаковых оснований при ранней эксплуатации. Жур.Автомобильные дороги, М.1984, №1, с.17-18.
6. Асмагулаев Б.А., Асмагулаев Р.Б. и др. Применение наноструктурированных шлакоминеральных бетонов. Промышленный транспорт Казахстана, 2021, №2, с.30–34.
7. Тейлор Х.Ф. Химия цемента. М.: Стройиздат, 1969. – С. 17–18. 7. Абланов Б.Ф., Белоусов Б.В., Асмагулаев Б.А. Кинетика твердения фосфоршлаковых вяжущих. Труды КазПТИ, Т.13, 1978, с. 69–75.
8. Асмагулаев Б.А. и др. Перспективы наномодифицированного бетона. Труды МАДИ, 2020, с. 75–88.
9. Asmatulayev B.A. Laser research on nanostructured concrete with colloidal structure for long term strengthening in highway operation. 1st edition of strenuous world congress on laser-science, optics & photonics. P.16-17 Apr.2024, London, UK.
10. Асмагулаев Б.А. и др. Патенты Республики Казахстан: — «Самовосстанавливающийся дорожный бетон», Инновационный патент KZ (13) A4 (11) №29852 МЮ от 15.05.2015, бюл. №5. С.4. — Способ строительства дороги с использованием фрезерованного асфальтового гранулята (Варианты) №4871 от 21.04.2020, бюл. №4 - «Наноструктурированный колееустойчивый асфальтобетон и наноструктурирующий минеральный порошок» KZ (13) U (11) №6701 от 10.12.2021, бюл. №49.

Сведения об авторах:

Асмагулаев Борис Айсаевич – техникалық ғылымдарының докторы, профессор, ғылыми директор, ЖШС «НИиПК «Каздоринновация», boris-aisa@mail.ru

Асмагулаев Борис Айсаевич – доктор технических наук, профессор, директор по науке, ТОО «НИиПК. «Каздоринновация», boris-aisa@mail.ru

Asmatulaev Boris Aisaevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of Research, LLP «NIiPK KazdorInnovation», boris-aisa@mail.ru

Асмагулаев Руслан Борисович – техникалық ғылымдарының кандидаты, ИТА көлік академигі, ЖШС «НИиПК «Каздоринновация», директор, kazdorin@mail.ru

Асмагулаев Руслан Борисович – канд. техн. наук, Академик транспорта ИТА, ТОО «НИиПК. «Каздоринновация», директор, kazdorin@mail.ru.

Asmatulaev Ruslan Borisovich – Candidate of Technical Sciences, ITA Transport Academy Member, Director, LLP «NIiPK KazdorInnovation», kazdorin@mail.ru

Асмагулаев Нурсултан Борисович – PhD доктор, ИТА академигі, «КаздорИнновация» ғылыми-зерттеу өндірістік компаниясының жобалау және зерттеу бөлімінің басшысы, boris-aisa@mail.ru

Асмагулаев Нурсултан Борисович - доктор PhD, академик ИТА, Руководитель проектно-изыскательского отдела научно-исследовательской производственной компании «КаздорИнновация», boris-aisa@mail.ru

Asmatulaev Nursultan Borisovich – PhD, ITA Academician, Head of the Design and Research Department, Scientific-Research Production Company «KazdorInnovation», boris-aisa@mail.ru

Вклад авторов:

Асматулаев Б.А. – научная концепция, обобщение результатов и подготовка текста статьи.

Асматулаев Р.Б. – проведение экспериментов, анализ данных, оформление материалов.

Асматулаев Н.Б. – практическая реализация, анализ эксплуатационных характеристик, согласование статьи.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**КОЛЛОИДТЫҚ ҚАТАЙТУ ҚҰРЫЛЫМЫ БАР ӨЗІН-ӨЗІ ҚАЛПЫНА
КЕЛТІРЕТІН БЕТОНДАР – ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ТӨЗІМДІ
АВТОЖОЛДАРДЫҢ БОЛАШАҒЫ**

Б.А. Асматулаев^{1*}, Р.Б. Асматулаев¹, Н.Б. Асматулаев¹

¹«Қаздоринновация» ғылыми-зерттеу және өндірістік компаниясы, Алматы қ., Қазақстан Республикасы

*Корреспондент автор: boris-aisa@mail.ru

Аңдатпа. Мақалада белитті жол цементі негізінде салынған бетоннан жасалған автомобиль жолдарының ұзақ мерзімді мониторингімен қатар, іргелі лазерлік және тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері келтірілген. Экологиялық таза белитті цемент өндіру үшін кен және көмір өңдеуден алынған ірі тоннажды техногендік минералды қалдықтар (ТМҚ) – шлактар мен күлдер қолданылады. Оларды оңтайлы механо-химиялық белсендіру кезінде ерекше байланыстырғыш қасиеттер байқалады. Жиналған 60 млрд тоннадан астам ТМҚ-ны кәдеге жарату Қазақстанның «Жасыл экономика» тұжырымдамасы аясында орнықты дамудың стратегиялық бағыты болып табылады.

Құрамында 80 % - ға дейін екікальцийлі силикат (C_2S) бар белитті цементтер жол жабындарының 50 жылдан астам қызмет ету мерзімін қамтамасыз етеді. Лазерлік зерттеулер кальций гидросиликаттарының ($C-S-H$) коллоидтық құрылымын анықтады, ол көлік және температуралық жүктемелер әсерінен бетонның өзін-өзі қалпына келтіруі мен қатайуын қамтамасыз етеді. Практикалық бақылаулар мұндай бетондардың ондаған жылдар бойы беріктігін арттыратынын дәлелдейді. Ғылыми жаңалық В. Михаэлис ұсынған 180 жыл бұрынғы коллоидтық қатайту теориясын тәжірибелік тұрғыдан растауда.

Түйінді сөздер: автомобиль жолдары, іргелі зерттеулер, экологиялық белитті цементтер, коллоидтық құрылымдар, тиксотропия және реопексия, төзімділік.

**SELF-HEALING CONCRETES WITH COLLOIDAL HARDENING STRUCTURE –
THE FUTURE OF ECOLOGICAL AND DURABLE ROADS**

B.A. Asmatulaev^{1*}, R.B. Asmatulaev¹, N.B. Asmatulaev¹

¹ «KazdorInnovation» Research and Production Company, Almaty, Kazakhstan

*Corresponding author: boris-aisa@mail.ru

Abstract. The article presents the results of long-term monitoring of roads made of concrete based on belite cement, along with fundamental laser and experimental studies. To produce environmentally friendly belite cement, large-tonnage technogenic mineral wastes (TMW) from ore and coal processing – slags and ashes – are used. When optimally activated through mechano-chemical treatment, these materials exhibit unique binding properties. The utilization of over 60

billion tons of accumulated TMW is a strategic direction for sustainable development within the framework of Kazakhstan's «Green Economy» concept.

Belite cements containing up to 80 % dicalcium silicate (C_2S) ensure the service life of road pavements for more than 50 years. Laser studies have revealed the colloidal structure of calcium hydrosilicates (C–S–H), which provides self-healing and hardening of the concrete under traffic and temperature loads. Practical observations confirm that such concretes increase their strength over several decades. The scientific novelty lies in the experimental confirmation of the colloidal hardening theory proposed by V. Michaelis 180 years ago.

Keywords: roads, fundamental research, ecological belite cements, colloidal structures, thixotropy and rheopexy, durability.



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/>).