

**НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫЕ МЕДЛЕННОТВЕРДЕЮЩИЕ
ДОРОЖНЫЕ БЕТОНЫ ДЛЯ ДОЛГОВЕЧНЫХ
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Д-р техн. наук, проф. **Б.А. Асматулаев**,
канд. техн. наук **Р.Б. Асматулаев**,
докторант **Н.Б. Асматулаев**,
инженер **А.Е. Ошанов**,
инженер **Р.А. Мазгутов**,
(ТОО КазНИИПИ «Дортранс», Казахстан)
Конт. информация: boris-aisa@mail.ru;
ruslan_asmatulayev@mail.ru;
activ-cz@mail.ru;
almazoshanov@mail.ru;
mazgutov_r@mail.ru

В начале нынешнего столетия выдвинуты новые требования для долговечных дорожных одежд по современным концепциям США и ЕС. В статье рассмотрены основные экспериментальные и практические исследования «самовосстанавливающихся дорожных бетонов», которые впервые разработаны в Казахстане и соответствуют этим требованиям. Долговечность дорожных бетонов обосновывается результатами физико-химических исследований структуры белитового цементного камня и физико-механических испытаний различных составов бетонов и кернов с дорог. Прочность бетонов продолжает упрочняться в течение более 40 лет. Предполагается, что найден путь к долговечным «римским бетонам».

Ключевые слова: долговечность, дорожные бетоны, физико-химические исследования, цементный камень, структура, физико-механические испытания, прочность.

В настоящее время в связи с изменением состава движения и повышением грузоподъемности автотранспорта до 12–13 тс на ось, срок службы дорожных одежд автомобильных дорог резко сократился: покрытия из асфальтобетона – до 5–6 лет, а из цементобетона – до 25–30 лет [1–4]. Существующее критическое положение, в части сокращения сроков службы дорожных одежд, обусловлено несоответствием технического состояния дорожных конструкций современному фактическому составу, интенсивности и динамичности движения транспортных потоков. Эффективность строительства автомобильных дорог из цементобетона оправдывается при сроках службы не менее 50 лет

[5, 6]. В начале нынешнего столетия это послужило импульсом к разработке новых концепций: «дорожных одежд с большой продолжительностью жизни» по европейской терминологии или «вечных дорожных одежд» в соответствии с терминологией, принятой в США. В связи с выдвинутыми концепциями, технический комитет «С 4.3 Дорожные одежды» Всемирной дорожной ассоциации (PIARC-IPCR) разработал программу и методику обследования дорожных одежд, пригласил экспертов и поручил им анкетировать долговечные участки. Основные принципы и условия долговечности дорог по концепциям США и Европейских стран приведены ниже.

Концепция вечных дорожных одежд (США). Под термином «вечная» (perpetual) дорожная одежда подразумевают хорошо спроектированную дорожную одежду, прослужившую более 50 лет. При этом невозможно ожидать, что верхний ее слой может прослужить 50 лет без изменения толщины, образования колеи, износа и других дефектов. Эксперты из 10 стран по 100 участкам дорог установили основные условия для достижения дорожными одеждами долговечности со сроком эксплуатации более 50 лет.

Концепция ЕС «Дороги с большой продолжительностью жизни» (ELLPAG). К дорожным одеждам с БПЖ относятся (жесткие, нежесткие, полужесткие), на которых при надлежащем уходе не наблюдается разрушения несущего слоя основания и которые требуют только замены верхнего слоя покрытия (слоя качения). С учетом этой замены дорожные одежды должны служить более 50 лет.

Основные условия долговечности дорог по концепциям вечных дорожных одежд или БПЖ (в порядке их значимости):

1. Обеспечение комфорта и безопасности транспортного движения по дорогам.
2. Устойчивость дорог под действием транспортных нагрузок и сезонного изменения климата.
3. Возрастающая несущая способность слоев дорожных одежд снизу вверх.
4. Повышенная прочность материалов покрытия на сжатие для восприятия высоких нагрузок сверху.
5. Экономическая и техническая эффективность.

В соответствии с пунктами 3–4 современных концепций США и стран ЕС, техническая эффективность применения покрытий с повышенной прочностью на сжатие и более прочных долговечных монолитных оснований – увеличение срока службы дорог до 50 и более лет. Новые концепции свидетельствуют о необходимости коренной переработки, действующей до сих пор в Казахстане и России методики проектирования дорог, с учетом «повышения несущей способности слоев до-

рожных одежд снизу вверх». Идея о создании более прочного основания, чем покрытия, не нова [6-8]. Для строительства долговечных монолитных оснований впервые в Казахстане разработаны составы медленно твердеющих белитовых цементов и освоено применение долговечных «самовосстанавливающихся дорожных бетонов», в том числе с использованием грунтощебеночных бетонных оснований «Жертас», на изобретения которых получены патенты Республики Казахстан. Белитовые цементы позволяют использовать в качестве заполнителей местные не кондиционные малопрочные материалы и грунты. О перспективах использования промышленных техногенных минеральных отходов (далее ТМО) в сочетании с цементом или цементной пылью, известью и другими активизаторами, неоднократно отмечалось в работах казахстанских и российских ученых [7-9]. Как сообщает профессор Б.С. Радовский [10], имеются потенциальные возможности по увеличению долговечности цементобетонных покрытий при сочетании портландцемента и техногенных отходов. В США в 2002 г. для строительства рулежных дорожек аэропорта в штате Техас использовали цемент (50 %) в сочетании с молотым гранулированным шлаком (25 %) и золой уноса (25 %). Бетон испытан в 2008 г., и утверждается, что «срок службы цементобетонного покрытия составит не менее 120 лет». Результаты многолетних исследований и мониторинга за опытными участками дорог в Казахстане, находящихся в эксплуатации уже в течение 35–43 лет, подтверждают достоверность выполненных теоретических и экспериментальных исследований. Ниже приводятся только основные результаты исследований и мониторинга дорог, подтверждающие многолетнюю долговечность и упрочнение дорожных бетонов, используемых в дорожном строительстве Казахстана в 1976-1984 гг. Применение самовосстанавливающихся медленно твердеющих дорожных бетонов в основаниях дает возможность значительно повысить темпы строительства и долговечность современных цементобетонных дорог. Автомобильная дорога 1 категории, «Астана-Щучинск», участок 07-57 км, построенная в 2007 г. с цементобетонным покрытием на основании из самовосстанавливающегося золобетона, уже в течение 12 лет эксплуатируется в идеальном состоянии. Состав золобетона принят по патенту «Жертас»: зола уноса Астанинской ТЭС – 18 %, цемент – 4 %, грунт супесчаный – 48 %, щебень фракции 10-20 мм – 30 % и сверх 100 % ферментный стабилизатор – 0,002 % с водой затворения. В то же время остальные участки км 58-212 этой дороги с основанием из щебеночно-песчаной смеси, укрепленной 7 % портландцемента, имеют деформации, требующие ремонтных работ, со второго года эксплуатации. Эффект самовосстанавливающихся бетонов объясняется за счет коренного изменения макро- и микроструктуры дорожного бетона, путем перехода от

кристаллической к более тиксотропной структуре цементного камня. Общеизвестно, что технологические режимы строительства бетонных дорог обуславливаются сроками схватывания дорожных портландцементов и скоростью гидратации основных четырех клинкерных минералов: **C3S**, **C2S**, **C3A** и **C4AF**. В табл. 1 приведено сравнение химико-минералогических составов традиционных портландцементов (далее – алитовые цементы) и медленнотвердеющих высокотехнологичных цементов (далее – белитовые цементы).

Таблица 1

Химико-минералогические составы алитовых цементов и медленно твердеющих белитовых цементов

<i>Виды цементов</i>	<i>Химический состав, масс. %</i>			
	<i>CaO</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>
<i>АЛИТОВЫЙ</i>	60-67	17-25	3-8	0.2 - 6
<i>БЕЛИТОВЫЙ</i>	33-46	39-61	3-10	3-5
	<i>Минералогический состав, масс. %</i>			
	<i>C₃S (Алит)</i>	<i>C₂S (Белит)</i>	<i>C₃A</i>	<i>C₄AF</i>
<i>АЛИТОВЫЙ</i>	40-75	5-25	2-15	5-20
<i>БЕЛИТОВЫЙ</i>	10-35	60-85	3-5	2-7

Примечание: условные наименования цементов даны по преобладающему содержанию минералов: C3S – Алит, C2S – Белит.

Преобладающее содержание в клинкере портландцемента быстротвердеющих: высокоосновного трехкальциевого силиката (**C3S-Алит**), трехкальциевого алюмината (**C3A**) и четырехкальциево-гоаюмоферрита (**C4AF**), степень гидратации которых достигает практически 100 % в течение 28 суток, обуславливает быстрое схватывание и твердение дорожного портландцемента и бетона, с созданием цементного камня, в основном, кристаллической структуры. Применение портландцемента требует четкой организации производства дорожно-строительных работ, в ограниченные по времени, зависящие от сроков схватывания и быстрого твердения цементобетона. В то же время степень гидратации двухкальциевогосиликата (**C2S-Белит**) только через 180 суток едва достигает 50 %, с образованием аморфных новообразований, с длительным сохранением тиксотропной структуры. Для дорожного строительства, имеющего специфику линейно-поточного характера производства работ, необходимы высоко технологичные материалы. Поэтому для обеспечения медленного затвердевания новых це-

ментов в их составах увеличено до 60–85 % содержание медленно твердеющего низкоосновного двухкальциевого силиката (С2S-Белит) и снижено количество быстротвердеющих: высокоосновных силикатов С3S-Алит, алюминатов С3А и алюмоферритов С4АФ до минимума. Фосфорные и доменные шлаки, бокситовые шламы и золы ТЭЦ являются основными компонентами белитовых цементов и самовосстанавливающихся дорожных бетонов. Физико-химическими исследованиями подтверждено [11], что минералогический состав белитового цементного камня, преимущественно состоит из медленно твердеющих низкоосновных силикатов С2S-Белит, по сравнению с кристаллическими новообразованиями портландцемента. Формирование структуры медленно твердеющего цементного камня, в процессе его твердения в течение 8 лет, проиллюстрировано фотоснимками разломов цементных балочек, испытанных на растяжение при изгибе (**рис. 1.**) Характер медленного разложения зерен цемента и возникновения новообразований наглядно показан на **рис. 1.**

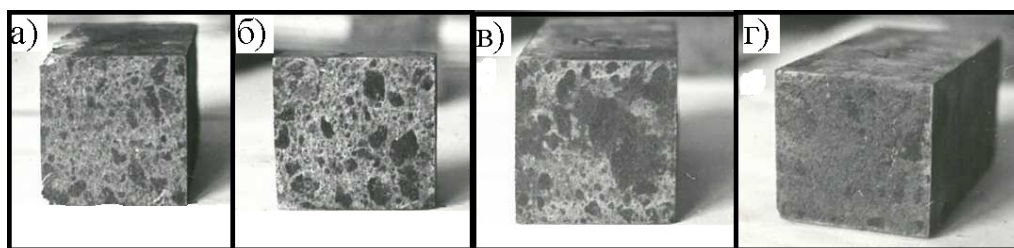


Рис. 1. Фотоснимки разломов образцов, твердевших в нормальных условиях и испытанных через 1 год (а), 3 года (б), 6 лет (в) и 8 лет (г)

На **рис. 1а** четко наблюдается неразложившиеся зерна цемента и зерна, с образовавшейся периферийной оболочкой, которая постепенно растет (см. **рис. 1 б**) и переходит в аморфные гелевидные новообразования (см. **рис. 1 в**). Аморфизм этих новообразований обуславливается нечеткостью и расплывчатостью их граней и беспорядочным их ростом во всех направлениях. Наряду с аморфитами наблюдаются единичные кристаллики С-S-N (см. **рис. 1 б**). В имерсии гель представлен бесцветной изотропной массой с показателем светопреломления 1,330–1,567. Количество гелевидных новообразований в пробах с увеличением возраста образцов повышается. Но даже через 8 лет твердения в нормальных условиях в пробах цемента наблюдаются негидратированные зерна, что свидетельствует о потенциальной возможности цемента к дальнейшему твердению. Рентгенограммы белитового цементного камня, приведенные на **рис. 3**, подтверждают полученные данные.

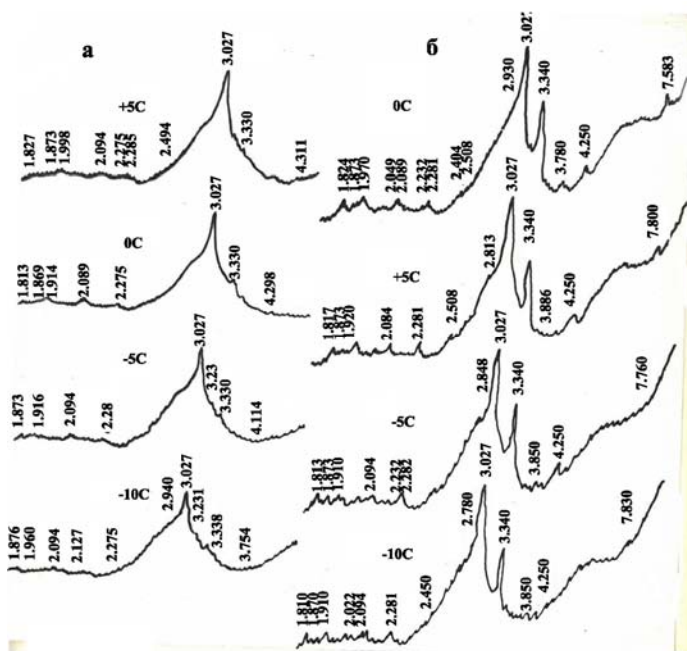


Рис. 2. Рентгенограммы образцов белитового цементного камня, твердевшие в течение 3-х месяцев при температурах +5; 0; -5; -10 °С:
а) после 1 месяца выдерживания в нормальных условиях;
б) без выдерживания в нормальных условиях

Таким образом, независимо от температурных режимов твердения белитового цементного камня (в пределах опыта) и сроков выдерживания, фазовый состав новообразований не претерпевает сколько-нибудь значительных изменений. О замедлении процессов гидратации цемента с понижением температуры твердения свидетельствует уменьшение дифракционной линии, соответствующей межплоскостному расстоянию 3,027 Å, по сравнению с 3,039 Å, при твердении при положительных температурах, которые свидетельствуют о наличии С-S-H, детально описанного Х.Ф. Тейлором [11].

В ряде работ отмечается, что строительство дорог с использованием медленно твердеющих дорожных смесей необходимо устраивать в начале лета или хотя бы за два месяца до первого мороза, чтобы к зиме они успели затвердеть. Поэтому с целью проверки этого положения рассмотрим влияние температуры твердения на дальнейший рост прочности белитового цементного камня, предварительно выдержанного в течение 30 сут. в нормальных условиях. На **рис. 3** показаны результаты

испытания ряда образцов 5, 6, 7, 8 по сравнению с образцами, постоянно твердевших в нормальных условиях.

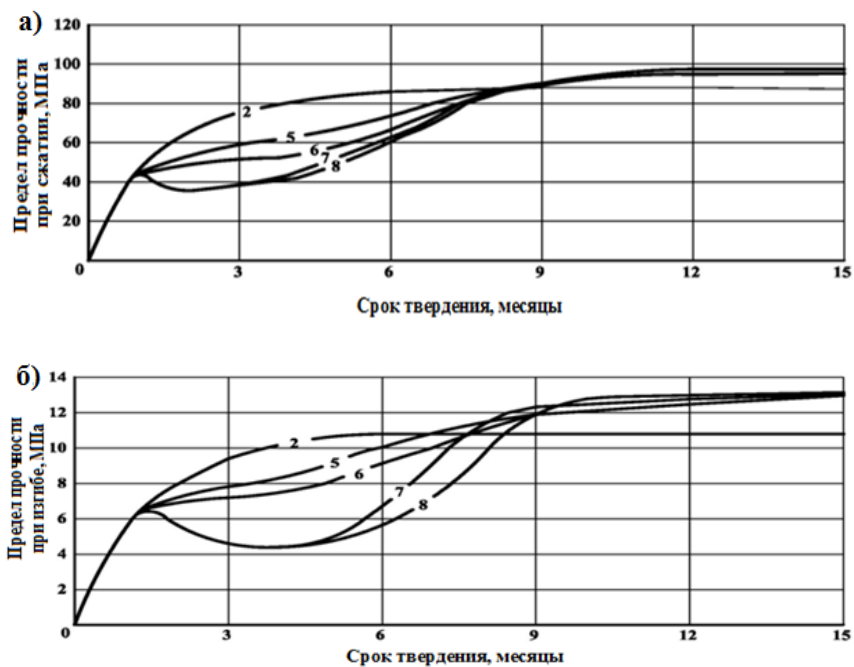


Рис. 3. Кинетика изменения прочности образцов белитового цементного камня во времени:

2 – постоянно в нормальных условиях;

5, 6, 7, 8 – предварительно выдержанных 1 месяц при нормальных условиях, затем 5 месяцев, соответственно при +5°C; 0°C; -5°C, -10°C, далее опять в нормальных условиях в течение 9 месяцев;

а) прочность на сжатие; б) прочность на растяжение при изгибе

Данные 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. Так, прочность образцов месячного возраста нормального твердения после трех месяцев выдержки их при температуре +5 °С (серия 5) возросла при сжатии на 33 %, изгибе – на 38 %, а при 0 °С (серия 6) всего лишь соответственно на 22 и 20 %. При температуре -5 °С (серия 7) и -10 °С (серия 8) практически роста прочности не наблюдается, а отмечается даже некоторое ее снижение. При дальнейшем выдерживании в нормальных условиях прочность всех образцов серии 5 – 8 превышает на сжатие до 10 %, а на растяжение при изгибе до 18 %, чем прочности образцов серии 2, постоянного нормального твердения. Увеличение проч-

ности при изгибе свидетельствует о повышении дисперсности новообразований, что приводит к улучшению деформативных свойств структуры цементного камня. Бетонные слои дорожных одежд подвергаются многоциклическим транспортным нагрузкам и сезонным изменениям температур, с переходом температур через ноль градусов в течение многих лет эксплуатации дорог. Как показывает опыт, самовосстанавливающиеся бетоны упрочняются в течение многих десятков лет, более интенсивно, по сравнению с лабораторными образцами. В **табл. 3** представлены результаты испытания кернов, высверленных из бетонного основания автодороги «Фоголевка-Жданово», построенной в декабре 1977 г.

Таблица 3

Результаты испытания кернов из бетонного основания автомобильной дороги «Фоголевка-Жданово»

<i>Наименование измеряемого показателя</i>	<i>Испытание кернов 1989 г., МПа (возраст бетона – 12 лет)</i>	<i>Испытание кернов 2005 г., МПа (возраст бетона – 28 лет)</i>
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

При проектных марках дорожных бетонов, предназначенных для строительства опытных участков дорог, их прочность в возрасте 90 суток составляет 15-20 МПа, фактическая прочность бетонов в возрасте 28-39 лет эксплуатации достигла 36-45 МПа, т.е. повысилась более чем в 2 раза (**рис. 4**).

Это свидетельствует о том, что дорожные белитовые бетоны обладают свойством самовосстановления и длительного упрочнения в условиях воздействия постоянных динамических вибрационных транспортных и климатических нагрузок. Для объяснения полученного эффекта авторами были проведены детальные физико-химические исследования. Полученные нами результаты петрографического, рентгеноструктурного, дифференциально-термического анализов и наблюдения с помощью сканирующего электронного микроскопа, показали, что при твердении белитовых цементов, основными структурообразующими новообразованиями в бетоне являются гелевидные низкоосновные гидросиликаты кальция типа C-S-H [12].

Полученные экспериментальные результаты позволяют предположить, что из всех теорий твердения минеральных вяжущих можно выделить коллоидно-химическую теорию В. Михаэлиса [11, 12], которая, очевидно будет более обоснованной для объяснения процессов твердения белитовых цементов.

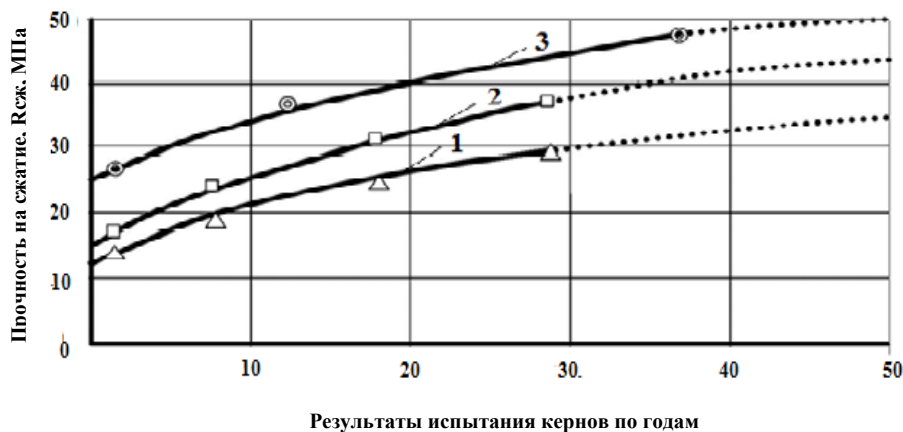


Рис. 4. Кинетика набора прочности самовосстанавливающихся дорожных бетонных оснований опытных участков дорог, построенных в 1976-1984 гг.:

1, 2 и 3 соответственно содержание белита (С₂S) в цементах: 60; 70 и 80 %

При нормальной температуре гидросиликаты С-S-H формируются в виде пластинчатых субмикрорекристаллов, средняя длина которых близка к 10000Å (1 мк), а ширина и толщина составляет, соответственно, $360-560\text{Å}$ и $20-30\text{Å}$. Ввиду очень малых размеров гидросиликатов, а также их способности адсорбировать на своей поверхности воду, гидросиликаты имеют свойства коллоидов. Таким гидросиликатам кальция свойственны связи, отличные от жестких кристаллизационных связей. При этом структура, образованная аморфными продуктами, имеет преимущество перед кристаллизационными связями, так как не вызывает значительного кристаллизационного давления, причем контакты термодинамически устойчивы. Гидросиликаты типа С-S-H имеют сходство со слоистыми минералами набухающих глин. Проявляется это сходство в способности обратимо отдавать часть воды, заключенной между слоями кристаллической решетки. Потеря или насыщение водой сопровождается изменением расстояния между слоями кристаллической решетки гидросиликата С-S-H, что приводит к изменениям прочности материала. Дальнейшее выдерживание материала во влажных условиях обеспечивает адсорбцию влаги гелем, восполнение связующих водных пленок

между слоями решетки гидросиликата и восстановление прочности материала (рис. 3, 4). Поэтому белитовые дорожные бетоны обладают свойством самовосстановления вне зависимости от температурно-климатических изменений и динамических транспортных нагрузок.

Основным структурообразующим компонентом в белитовом цементном камне являются низкоосновные гидросиликаты кальция C-S-H, которые представляют собой аморфный клей, наноразмерных величин [13, 14], обладающие свойством длительной тиксотропии. В белитовом цементном камне кристаллогидраты, содержание которых составляет от 20 % до 40 % в массе C-S-H клея, играют роль дисперсно-армирующих составляющих и не препятствуют глубокой гидратации зерен цемента. В традиционном алитовом цементном камне кристаллогидраты преобладают более чем в 4 раза содержания аморфного «клея» C-S-H. Поэтому в процессе твердения алитовый цементный камень не успевает полностью прогидратироваться, из-за быстрого формирования водонепроницаемых кристаллических новообразований. Общеизвестно, что в цементном камне негидратированный объем цемента составляет более 40 %, названный «микробетоном Юнга». Бетон – самый распространенный строительный материал, являющийся наноструктурным многофазным композитным материалом, который созревает со временем. Он состоит из аморфной фазы, кристаллов размером от нано- до микрометра и связанной воды. Свойства бетона, как и деструкционные характеристики, существуют в многомасштабном диапазоне (от нано- до микро- и макроуровней), когда свойства материала на каждом уровне формируются на базе свойств предыдущей ячейки меньшего размера [13-15]. Аморфная фаза гидросиликата кальция (C-S-H) – это «клей», который скрепляет компоненты бетона [16, 17] и сам по себе является наноматериалом. Наноинженерия охватывает методы манипулирования структурой на наномасштабном уровне для разработки нового поколения оптимальных, многофункциональных вяжущих составов с высокими механическими характеристиками, а также таких новых свойств, как самозалечивание, высокая пластичность и самоконтроль трещин. Стало очевидным, что важные свойства структуры C-S-H цементных фаз проявляются на наномасштабном уровне, и необходимо понимание физико-химических процессов для прогнозирования и контроля макромасштабных свойств и характеристик материалов. В последнее время, благодаря заинтересованности в формировании устойчивых структур бетона [13, 18, 19], большое внимание уделяется наноразмерной модификации структуры C-S-H для создания гибридных, органических, цементирующих нанокompозитов. Слоистая конструкция и склонность кремниевых цепочек (кроме тетраэдрической) к структурным дефектам в C-S-H [13, 16] открывают возможность для введения разнообразных органиче-

ских молекул в базовую структуру C–S–H. Предложено три схемы для гибридизации или введения «гостевых молекул» в C–S–H. Первая схема интерполирует органические молекулы в слой C–S–H [20].

Нами исследованы такие свойства белитовых нанцементов, как самозалечивание, с целью отработки технологии производства дорожно-строительных работ при различных температурах круглогодичного строительства и эксплуатации автомобильных дорог.

Это также подтверждается изменением количества прочносвязанной воды в цементном камне образцов, выдержанных при различных температурных режимах (рис. 5).



Рис. 5. Кинетика изменения количества прочносвязанной воды в образцах белитового цементного камня в процессе твердения при различных температурах:

*2 – постоянно в нормальных условиях;
5,6,7,8 – предварительно выдержанных 1 месяц при нормальных условиях, затем 5 месяцев, соответственно при +5°C; 0°C; -5°C, -10 °C, далее опять в нормальных условиях в течение 2 месяцев*

Результаты изменения количества прочносвязанной воды в цементном камне (рис. 5), установленного путем измерения потерь массы проб после их прокаливания при 1000 °С, предварительно выдержанных при 105 °С, подтверждают следующее. Ввиду очень малых размеров гидросиликатов в структуре цементного камня, а также их способности адсорбировать на своей поверхности воду, гидросиликаты от различных нагрузок не разрушаются, а только отжимают влагу из гелевидных новообразований. Кинетики изменений прочности (рис. 3) и количества прочносвязанной воды (рис. 5) цементного камня, в зависимости от температуры выдерживания проб, аналогичны, что подтверждает достоверность теоретических предпосылок о самовосстанавливающихся свойствах белитового цемента. При выдерживании цементного камня при низких температурах (пробы 5, 6, 7 и 8), снижение прочности (рис. 3) сопровождается вытеснением

прочносвязанной воды (**рис. 5**) из волокнистых новообразований в количестве 10–30 % от массы имеющейся влаги в их капиллярах, а при дальнейшем выдерживании при нормальных условиях их количество и прочность цементного камня восстанавливаются в течение одного месяца. При дальнейшем выдерживании при нормальных условиях в течение трех месяцев прочность и количество прочносвязанной воды превышает показатели проб нормального твердения. Это свидетельствует об углублении процессов гидратации зерен цемента и повышении дисперсности новообразований при низких температурах выдерживания, что также повышает прочность цементного камня (**рис. 3, 5**).

Таким образом, из всех теорий твердения минеральных вяжущих можно выделить коллоидно-химическую теорию В. Михаэлиса, которая, очевидно, будет более приближенной для обоснования твердения белитовых цементов. Прочностные, деформативные свойства и морозостойкость дорожных бетонов на основе медленнотвердеющих белитовых цементов изучали на образцах-балочках размером 100x100x400 мм и образцах-цилиндрах высотой и диаметром 100 мм. Бетонную смесь уплотняли на гидравлическом прессе под нагрузкой 20 МПа в течение 3 мин. Образцы хранили при положительных температурах в ваннах с гидравлическим затвором, а при низких температурах в холодильных камерах – плотно упакованными в полиэтиленовые пакеты. Количество образцов готовили не менее трех из расчета повторяемости при измерении, что обеспечивает надежность опыта, равную 0,95, при относительной погрешности не более 5 %.

На **рис. 6** представлены результаты испытаний прочности различных составов дорожных бетонов в зависимости от количества белитового цемента, которые подтверждают вывод о длительном росте прочности бетонов в течение 2-х лет.

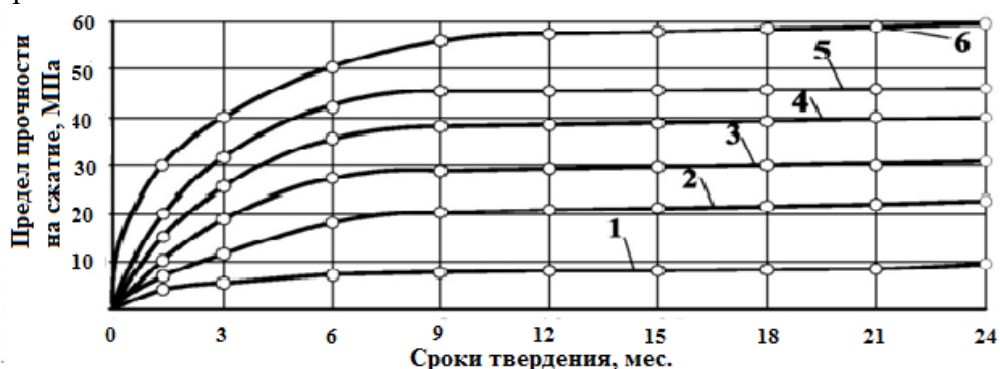


Рис. 6. Кинетика набора прочности дорожного бетона во времени от количества белитового цемента:

1, 2, 3, 4, 5, 6, соответственно: 5, 10, 15, 20, 25 и 30 мас. % цемента

При испытании образцов бетона в возрасте 90 суток на морозостойкость было проведено до 200 циклов замораживания и оттаивания. Как видно из **рис. 8, 9**, происходит незначительное снижение прочности за счет отжатия влаги из капилляров и снижения ее количества. При дальнейшем выдерживании образцов при нормальных условиях, прочность бетонов полностью восстанавливается и даже превосходит по прочности бетонов 90-суточных образцов (**рис. 7**).



Рис. 7. Самовосстановление прочности дорожного бетона, испытанного на морозостойкость (МРЗ-200), в зависимости от количества белитового цемента:

1, 2, 3, 4 и 5, соответственно:

10, 15, 20, 25 и 30 мас. % цемента с содержанием $C_2S_{75} - 80\%$

Дорожные белитовые бетоны обладают медленным твердением по сравнению с традиционными алитовыми цементами, но прочностные показатели бетонов в возрасте 180 суток практически сравниваются, а деформативные показатели белитового бетона даже превышают показатели алитового бетона. При этом прочность на растяжение при изгибе на 31 % выше, модуль упругости ниже на 5000 МПа (**табл. 4**).

Высокие деформативные свойства медленнотвердеющего бетона свидетельствуют о высокой дисперсности и прочности на растяжение (когезионной связи) новообразований цементного камня белитовых цементах (**рис. 8**).

Результаты рентгенофазовых, термографических (не приведены) и электронно-микроскопических исследований (**рис. 8**) подтверждают, что в таких бетонах вышеуказанные технологические и эксплуатационные преимущества обеспечиваются в основном гелевидной структурой твердения белитовых цементах. Дорожные бетоны сохраняют «самозалечивающие» свойства, за счет водопроницаемости волокнистых новообразований и продолжающееся углубление гидратации цементного камня с ростом прочности в течение многолетней эксплуатации дорог.

В структуре традиционного алитового портландцементного камня, напротив, незначительным содержанием гелевидных двух кальциевых гидросиликатов заполняют только свободное пространство внутри основного каркаса, образованного срастанием крупных кристаллогидратов (рис. 8).

Таблица 4

Сопоставление показателей дорожного цементбетона и медленнотвердеющего дорожного бетона на белитовом цементе

Состав дорожного бетона, мас. %				Пределы прочности в возрасте 180 сут, МПа		Модуль упругости E_u , МПа	
Щебень фракций, мм		Песок $M_{кр}=2,5$	Цемент, %	(среднее значение из 3-х)			
5-10	10-20			$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{изг}/R_{сж}$	
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

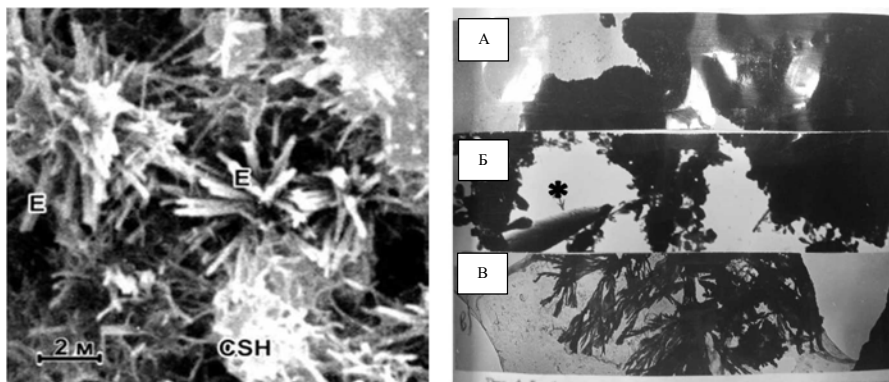


Рис. 8. Микроструктуры алитового и белитового цементного камня (X 25000):
слева – алитовый цементный камень, через 28 сут.;
E – кристаллы этtringита; *CSH* – волокна C-S-H [11];
справа – белитовый цементный камень [12]:
A – через 28 сут.; *Б* – через 90 сут.; трубочка (*) C-S-H;
В – через 180 сут., волокна C-S-H

Для подтверждения возможности введения органических молекул битума в базовую структуру С–S–Н, приводим результаты по испытанию органоминерального бетона при реконструкции автомобильной дороги «Астана-Боровое».

Таблица 5

Результаты подбора составов органоминеральных смесей для монолитного дорожного основания

№ состава смеси	Используемые материалы в составе смеси, %						
	Асфальто-бетонный гранулят	Щебень из доменного шлака фр. 5-20	Щебень из доменного шлака фр.20-40	Белитовое вяжущее без помола	В том числе цемент М-400	Вода, сверх 100 %	Битум, сверх 100 %
1	40,0	10,0	30,0	20,0	2,0	3,0	2
2	40,0	10,0	30,0	20,0	2,0	3,0	0
3	30,0	20,0	30,0	20,0	2,0	3,0	2,0
4	50,0	10,0	25,0	15,0	2,0	3,0	2,0
5	50,0	10,0	25,0	15,0	2,0	3,0	0
6	60,0	10,0	20,0	10,0	2,0	3,0	2,0
7	70,0	10,0	15,0	5,0	2,0	3,0	2,0
8	70,0	10,0	15,0	5,0	2,0	3,0	0

Таблица 6

Результаты испытаний образцов из органоминеральных бетонов после пропаривания

№ состава смеси	Плотность, г/см ³	Прочность пропаренных образцов, $R_{сжж}$, МПа, при температурах		
		0 °С	20 °С	50 °С
1	2,22	3,56	2,15	0,78
2	2,27	3,52	3,25	1,47
3	2,31	3,48	2,27	0,79
4	2,25	3,62	2,27	0,82
5	2,24	3,51	3,35	1,51
6	2,20	3,62	3,20	1,44
7	2,21	3,68	2,18	0,72
8	2,31	3,58	3,39	1,41

Таблица 7

Прочность образцов органоминеральных бетонных кернов, вырезанных из основания (различного возраста)

Возраст образца	Прочность на сжатие $R_{ж}$, МПа, при t °С			
	20 °С	50 °С	0 °С	-10 °С
1 сутки	4,81	2,29	7,4	7,9
2 года	9,44	3,32	12,5	18,6
3 года	13,15	4,22	13,8	22,5

Результаты испытаний, приведенные в табл. 5, 6, 7 показали, что введение дополнительно битума в количестве 2 % является излишним; снижается прочность и на покрытии дороги появляются выделения битума. Поэтому дорога построена с использованием состава № 8, с максимальным количеством асфальтового гранулята, равного 70 %. При испытании асфальтового гранулята, методом прокаливания, содержание битума составило в пределах 4-5 % по массе. Результаты испытания кернов подтверждают, что органоминеральный бетон упрочняется в течение 3 лет эксплуатации дороги (в пределах опыта). Прочность бетона на сжатие через два года повышается почти в 2 раза, а через три года в 2,7 раза и достигает 13, 15 МПа, что выше прочности традиционного асфальтобетона в 3 раза. Прочность органоминеральных бетонов, так же как и асфальтобетонов зависит от температуры испытания кернов

(табл. 7). Снижается прочность при повышении температуры до 50 °С и повышается при низких температурах, что свидетельствует о высокой деформативности органоминерального бетона, по сравнению с традиционными бетонами на основе цементов. Это свидетельствует о том, что в органоминеральном бетоне на уровне микроструктуры совместно взаимодействуют минеральное белитовое и органическое вяжущие, а также битум, содержащийся в асфальтовом грануляте. Это хорошо согласуется с выводами, сделанными по органо-шлако-щелочным смесям ранее профессором Н.В. Горелышевым [21].

Наномодифицированные бетоны отвечают требованиям современных концепции «вечных дорог» и «дорог с продолжительной жизнедеятельностью» США и стран ЕС, которые позволили разработать дорожные конструкции со сроком эксплуатации не менее 35- 50 лет. При этом необходимо проводить обновление каждые 5-7 лет верхнего слоя покрытия, выполненного из различных высокопрочных асфальтобетонов [22] (рис. 9).

В структуре традиционного алитового портландцементного камня, напротив, незначительное количество гелевидных двухкальциевых гидросиликатов заполняет только свободное пространство внутри основного каркаса, образованного за счет срастания крупных кристаллогидратов. Основой каркаса являются высокоосновные гидросиликаты кальция, гидроалюминаты, гидроалюмоферриты, гидросульфалоюминаты и гидроксиды кальция. Указанные кристаллогидраты являются трудно влагопроницаемыми, что препятствует прониканию влаги к негидратированным зернам цемента (микробетон Юнга составляет более 40 %), и не обладают свойством самовосстановления после их разрушения. Поэтому срок службы цементобетонных покрытий не превышает 20 - 25 лет при их эксплуатации в резко-континентальных условиях Казахстана. Пример, цементобетонное покрытие на автомобильной дороге «Алма-Ата –Капчагай», построена в 1970 г. и перекрыта асфальтобетоном в 1990 г., из-за снижения эксплуатационного состояния покрытия.

Установлено, что образование преимущественно жестких кристаллизационных связей предопределяет ограниченные сроки существования тиксотропных свойств в цементном камне традиционных портландцементов. Это, в свою очередь, снижает производительность бетоноукладочного комплекса дорожных машин, так как требуется четкое соблюдение всех технологических операций и режимов, в ограниченные сроки схватывания и быстрого, в течение 1-2 суток упрочнения цементобетона, для своевременной нарезки температурных швов.



Рис. 9. Долговечная дорожная конструкция автомобильных дорог, сроком эксплуатации 35-50 лет в климатических условиях Казахстана, в соответствии с патентом Республики Казахстан [22]:

1. Слой износа из асфальтобетона периодически восстанавливаются в течение 3-7 лет, толщиной 6-15 см. На слоях износа из высокопрочного цементобетона периодически в течение 3-5 лет проводится чистка и замена заполнения швов, при необходимости ремонтные работы.

2. Монолитное покрытие прочностью на сжатие B25-B35 и F200, толщиной 26-30 см.

3. Дренарующие слои из гранулированных материалов одновременно используются для снижения амплитуды вибрации (при интенсивности движения автотранспорта с нагрузкой на ось 13 тс более 20 %, дренарующий слой устраивается дополнительно между слоями 4 и 5), прочность материалов – 100-120 МПа, толщиной 25-35 см.

4. Монолитное основание из наномодифицированного бетона прочностью на сжатие B15-B30 и F200, толщиной 26-30 см.

5. Монолитный рабочий слой земляного полотна из наномодифицированного грунтобетона прочностью B15-B20 и F100, толщиной 30-35 см.

6. Уплотненный грунт земляного полотна, с коэффициентом КУ не менее 0,98.

Примечание: Прочность бетонов; первая цифра проектная, а вторая перспективная. Толщины слоев указаны с учетом сроков эксплуатации; меньшая - 35 лет, большая - 50 лет

Институтом КазНИИПИ «Дортранс» на основе многолетних научных исследований, апробированных при строительстве дорог в Казахстане, предложена инновационная концепция строительства дорог, которая обеспечивает при одновременном ресурсосбережении, долговременную эксплуатационную надежность дорог на срок не менее 35-50 лет. Основная идея новой концепции состоит не только в самовосстановлении, но и в увеличении прочности и долговечности дорожных конструкций с переводом их на более высокую категорию по мере изменения состава и интенсивности транспортного движения. Инновационная концепция строительства автомобильных дорог (дорожных конструкций) предусматривает полное ресурсосбережение на всех стадиях «жизнедеятельности» автомобильной дороги: при строительстве, ремонте и реконструкции, с полной утилизацией всех материалов и повторным их использованием. Установлено, что при обработке медленно твердеющими белитовыми цементами к применению пригодны все материалы перестраиваемых дорог: асфальтобетонный и бетонный лом, некондиционные каменные, песчаные и грунтовые материалы. Использование новых материалов в дорожных конструкциях дорог, как показала практика, обеспечивает срок эксплуатационной службы дорожных конструкций не менее 35-50 лет. Инновационная деятельность, осуществляемая Институтом КазНИИПИ «Дортранс», позволила добиться ряда положительных результатов. По всем новым ДСМ и технологиям получены более 60-ти инновационных патентов Казахстана, разработаны и утверждены более 30-ти нормативно-технических документов, которые используются при проектировании и строительстве автомобильных дорог. Вышеизложенные результаты многолетних исследований, практического опыта строительства и мониторинга за поведением различных конструкций дорожных одежд, построенных на основе предлагаемых инновационных материалов и технологий, а также требований долговечности автомобильных дорог, в соответствии с современными концепциями США и ЕС, позволяют сделать следующие выводы.

ВЫВОДЫ

1. Самовосстанавливающиеся дорожные бетоны обладают «иммунной» структурой самозалечивания деструкций от температурных нагрузок (отрицательных и низких положительных температур), которая обуславливается некоторым временным снижением прочности, не за счет деструктивных процессов в бетоне, а только за счет потери (отжатия) небольшого количества прочносвязанной воды из структуры бетона (5-30 % в зависимости от величины отрицательной температуры). После снятия отрицательных температурных нагрузок, с наступлением положитель-

ных температур, прочность бетона полностью восстанавливается, и, как правило, превышает первоначальную прочность. При этом, чем на большую величину было снижение прочности и количества связанной воды, тем на большее количество происходит увеличение связанной воды и тем выше рост прочности бетона. Учитывая эти самовосстанавливающиеся свойства белитового цементного камня, такая структура условно названа «иммунной», на подобие живой природной системы самовосстанавливания.

2. Преобладающее содержание наноразмерных гидросиликатов С-S-H в белитовом цементном камне способствует приданию дорожному бетону свойства самовосстанавливания прочности и от транспортных нагрузок. Установлено, что при полном механическом разрушении бетонных образцов (такие жёсткие условия созданы для установления длительности сохранения тиксотропии и технологичности бетона) и повторном формовании образцов, свойство тиксотропии сохраняется до 150 измельчений образцов с набором в дальнейшем первоначальной прочности. Это свойство самовосстановления прочностных свойств бетона подтверждается при эксплуатации дорожных конструкций в течение 40 лет, с ежегодным переходом температуры через ноль градусов порядка до 80-90 раз в Южно-Казахстанской области РК. При таких жестких условиях попеременного замораживания и оттаивания порядка 3200-3600 циклов, прочность бетона не снизилась, как следовало бы ожидать от традиционных бетонов, а возросла с М150-200 до М 400-500. Это подтверждает теоретические предпосылки и результаты химико-минералогических исследований, что наноразмерные гидросикаты С-H-S не разрушаются, а только отжимают некоторое количество прочносвязанной воды и затем, при положительных температурах полностью восстанавливаются, а за счёт углубления гидратации зерна цемента, прочность и количество влаги превышает первоначальную величину.
3. Инновационные наномодифицированные бетоны, созданные на основе белитовых наномодифицированных белитовых цементов являются высоко технологичными строительными материалами с «иммунной структурой самовосстановления» от транспортных и климатических нагрузок, новизна которых подтверждена рядом патентов на изобретения. Наномодифицированные бетоны отвечают требованиям современных концепций «вечных дорог» и «дорог с продолжительной жизнедеятельностью» США и стран ЕС, которые позволили разработать дорожные конструкции со сроком эксплуатации не менее 35- 50 лет. При этом необходимо

- проводить обновление каждые 5-7 лет верхнего слоя покрытия, выполненного из различных высокопрочных асфальтобетонов.
4. Из опыта США, не исключаются пути повышения долговечности цементобетонных покрытий путем корректировки минералогических составов традиционных портландцементов и увеличения количества гидросиликатов C_2S , что потребует изменения требований к дорожным портландцементом и бетонам на их основе.
 5. Применение дорожных конструкций с возрастающей прочностью «снизу вверх» в соответствии с новыми концепциями потребует изменения методик проектирования и расчета дорожных одежд нежесткого и жесткого типов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кочетков А.В. Расчет и конструирование дорожных одежд / А.В. Кочетков, Н.В. Кокодеева, П.Б. Рапопорт, Н.В. Рапопорт, И.Г. Шашков // Автомобильные дороги. – 2011. – №12. – С. 86-94.
2. Паткина И.А. К вопросу о новых методах оценки работоспособности цементобетона для дорожных и мостовых сооружений / И.А. Паткина, Т.А. Пошихонова, П.Н. Рогачев // ДОРОГИ И МОСТЫ. – 2011. – № 26/2. – С. 295-310.
3. Ушаков В.В. Ремонт цементобетонных покрытий автомобильных дорог: обзорная информ. / Информационный центр автомобильных дорог. – М., 2002. – Вып. 6. – 28 с.
4. Носов В.П. Причины образования уступов на цементобетонных покрытиях автомобильных дорог / В.П. Носов // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2008. – № 3. – С. 23-26.
5. Асмагулаев Б.А., Асмагулаев Р.Б., Шестаков В.Н. Теория и практика инновационных технологий в дорожном строительстве Казахстана: материалы Международной 66-й научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «СИБАДИ». – Омск, 2012. – Кн. 1. – С. 33-38.
6. Радовский Б.С. Концепция вечных дорожных одежд / Б.С. Радовский // Каталог-справочник: Дорожная техника. – 2011. – С. 120-132.
7. Асмагулаев Б.А. Укатываемый бетон на основе шлакового вяжущего / Б.А. Асмагулаев, А.М. Шейнин, В.И. Чумаченко и др. // Автомобильные дороги. – 1993. – № 9. – С.18-20.
8. Исаев В.С., Еркина Н.А., Юмашев В.М., Васильев Ю.М., Саль А.О., Асмагулаев Б.А. Методические рекомендации по строительству оснований и покрытий из щебеночных, гравийных и песчаных материалов, обработанных неорганическими вяжущими / Минтрансстрой СССР, СоюздорНИИ. – М., 1985. – 150 с.
9. Инновационный патент РК № 29852. Самовосстанавливающийся дорожный бетон / Асмагулаев Б.А. и др. Приоритет 27.12.2013 г.

- (Министерство юстиции РК); опубли. 15.05.15. – Астана, 2015. – Бюл. № 5.
10. Радовский Б.С. Цементобетонные покрытия в США: строительство / Б.С. Радовский // Автомобильные дороги. – 2015. – № 4 (100). – С. 56–62.
 11. Тейлор Х.Ф. Гидросиликаты кальция / Х.Ф. Тейлор // В книге: Химия цемента. – М.: Стройиздат, 1969. – С.17-18.
 12. Абланов Б.Ф., Белоусов Б.В., Асмагулаев Б.А. Исследование вещественного состава и кинетики твердения вяжущего на основе фосфорного шлака // В сборнике: Вопросы металлогении, вещественного состава и геологического строения месторождений Казахстана. – Алматы, 1978. – Вып. 13. – С.69-75.
 13. F. Sanchez, L. Zhang, C. Ince. Multi-scale performance and durability of carbon nanofiber/cement composites [Многоуровневая работа и долговечность углеродного нановолокна/цементных композитов]. In: Bittnar Z, Bartos PJM, Nemecek J, Smilauer V, Zeman J, editors. Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd International symposium on nanotechnology in construction). Prague, Czech Republic; 2009, p. 345–50.
 14. H.M. Jennings, J.W. Bullard, J.J. Thomas, J.E. Andrade, J.J. Chen, G.W. Scherer. Characterization and modeling of pores and surfaces in cement paste: correlations to processing and properties [Определение характеристики моделирование пор и поверхностей в цементном тесте: сопоставление обработки и свойств]. J. Adv. Concr. Technol. 2008; 6(1):5–29.
 15. F. Sanchez, A. Borwankar. Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cement based composites exposed to a decalcifying environment [Многоуровневая работа цементосодержащих композитов, армированных углеродным микроволокном, под влиянием декальцинирующей среды]. Mater Sci Eng: A. 2010; 527(13– 14): 3151-3158.
 16. K.P. Chong, E.J. Garboczi. Smart and designer structural material systems [Интеллектуальные и проектирующие системы конструкционных материалов]. Prog. Struct. Mat.Eng. 2002; 4:417-430.
 17. K. Sobolev. Mechano-chemical modification of cement with high volumes of blast furnace slag [Механо-химическая модификация цемента с высоким содержанием доменного шлака]. Cem. Concr. Compos. 2005; 27: 7-8.
 18. J. Minet, S. Abramson, B. Bresson, A. Franceschini, H. Van Damme, N. Lequeux. Organic calcium silicate hydrate hybrids: a new approach to cement based nanocomposites [Гибриды органического гидросиликата кальция: новый подход к нанокompозитам на основе цемента]. J. Mater. Chem. 2006; 16:1379-1383.
 19. A. Franceschini, S. Abramson, V. Mancini, B. Bresson, C. Chassenieux, N. Lequeux. New covalent bonded polymer–calcium silicate hydrate composites [Новые ковалентно-связанные композиты полимер-гидросиликата кальция]. J. Mater. Chem. 2007; 17:913-922.

20. H. Matsuyama, J.F. Young. *Intercalation of polymers in calcium silicate hydrate: a new synthetic approach to biocomposites?* [Введение полимеров гидросиликата кальция: новый синтетический подход к биокомпозитам.] *Che. Mater.* 1999; 11:16-19.
21. Горельишев Н.В. *Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы* / Н.В. Горельишев. – Можайск-Терра, 1995. – 176 с.
22. Патент РК на полезную модель. *Конструкция дорожной одежды на основе наномодифицированного бетона* / Асматулаев Б.А. Асматулаев Р.Б., Чумаченко В.И. и др. / Министерство юстиции РК. Нур-Султан, 2019. – Бюл. №26. – С.4.

L I T E R A T U R A

1. Kochetkov A.V. *Raschet i konstruirovaniye dorozhnyh odezhd* / A.V. Kochetkov, N.V. Kokodeeva, P.B. Rapoport, N.V. Rapoport, I.G. Shashkov // *Avtomobil'nye dorogi*. – 2011. – №12. – S. 86-94.
2. Patkina I.A. *K voprosu o novykh metodah ocenki rabotosposobnosti cementobetona dlya dorozhnyh i mostovyh sooruzhenij* / I.A. Patkina, T.A. Poshekhonova, P.N. Rogachev // *DOROGI I MOSTY*. – 2011. – № 26/2. – S. 295-310.
3. Ushakov V.V. *Remont cementobetonnyh pokrytij avtomobil'nyh dorog: obzornaya inform.* / *Informacionnyy centr avtomobil'nyh dorog*. – M., 2002. – Vyp. 6. – 28 s.
4. Nosov V.P. *Prichiny obrazovaniya ustupov na cementobetonnyh pokrytyyah avtomobil'nyh dorog* / V.P. Nosov // *Nauka i tekhnika v dorozhnoj otrasli*. – 2008. – № 3. – S. 23-26.
5. Asmatulaev B.A., Asmatulaev R.B., Shestakov V.N. *Teoriya i praktika innovacionnyh tekhnologij v dorozhnom stroitel'stve Kazahstana: materialy Mezhdunarodnoj 66-j nauchno-prakticheskoy konferencii FGBOU VPO «SIBADI»*. – Omsk, 2012. – Kn. I. – S. 33-38.
6. Radovskij B.S. *Koncepciya vechnyh dorozhnyh odezhd* / B.S. Radovskij // *Katalog-spravochnik: Dorozhnaya tekhnika*. – 2011. – S. 120-132.
7. Asmatulaev B.A. *Ukatyvaemyj beton na osnove shlakovogo vyazhushchego* / B.A. Asmatulaev, A.M. Shejnin, V.I. Chumachenko i dr. // *Avtomobil'nye dorogi*. – 1993. - № 9. - S.18-20.
8. Isaev V.S., Erkina N.A., Yumashev V.M., Vasil'ev Yu.M., Sal' A.O., Asmatulaev B.A. *Metodicheskie rekomendacii po stroitel'stvu osnovanij i pokrytij iz shchebenochnykh, gravijnyh i peschanyh materialov, obrabotannyh neorganichesкими vyazhushchimi* / *Mintransstroj SSSR, SoyuzdorNII*. – M., 1985. – 150 s.
9. *Innovacionnyj patent RK № 29852. Samovosstanavlivayushchijsya dorozhnyj beton* / Asmatulaev B.A. i dr. *Prioritet 27.12.2013 g.* (Ministerstvo yusticii RK); *opubl. 15.05.15*. – Astana, 2015. – Byul. № 5.
10. Radovskij B.S. *Cementobetonnye pokrytiya v SShA: stroitel'stvo* / B.S. Radovskij // *Avtomobil'nye dorogi*. – 2015. – № 4 (100). – S. 56–62.

11. Tejlor H.F. *Gidrosilikaty kal'ciya / H.F. Tejlor // V knige: Himiya cementa. – M.: Strojizdat, 1969. – S.17-18.*
12. Ablanov B.F., Belousov B.V., Asmatulaev B.A. *Issledovanie veshchestvennogo sostava i kinetiki tverdeniya vyazhushchego na osnove fosfornogo shlaka // V sbornike: Voprosy metallogenii, veshchestvennogo sostava i geologicheskogo stroeniya mestorozhdenij Kazahstana. – Almaty, 1978. – Vyp. 13. – S. 69-75.*
13. F. Sanchez, L. Zhang, C. Ince. *Multi-scale performance and durability of carbon nanofiber/cement composites [Mnogourovnevaya rabota I dolgovechnost' uglerodnogo nanovolokna/cementnyh kompozitov]. In: Bittnar Z, Bartos PJM, Nemecek J, Smilauer V, Zeman J, editors. Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd International symposium on nanotechnology in construction). Prague, Czech Republic; 2009, p. 345–50.*
14. H.M. Jennings, J.W. Bullard, J.J. Thomas, J.E. Andrade, J.J. Chen, G.W. Scherer. *Characterization and modeling of pores and surfaces in cement paste: correlations to processing and properties [Opredelenie harakteristiki modelirovanie por i poverhnostej v cementnom teste: sopostavlenie obrabotki i svojstv]. J. Adv. Concr. Technol. 2008; 6(1):5–29.*
15. F. Sanchez, A. Borwankar. *Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cement based composites exposed to a decalcifying environment [Mnogourovnevaya rabota cementosoderzhashchih kompozitov, armirovannyh uglerodnym mikrovloknom, pod vliyaniem dekal'ciniruyushchej sredy]. Mater. Sci. Eng: A. 2010; 527(13–14): 3151–3158.*
16. K.P. Chong, E.J. Garboczi. *Smart and designer structural material systems [Intellektual'nye i proektiruyushchie sistemy konstrukcionnyh materialov]. Prog. Struct. Mat. Eng. 2002; 4:417-430.*
17. K. Sobolev. *Mechano-chemical modification of cement with high volumes of blast furnace slag [Mekhano-himicheskaya modifikaciya cementa s vysokim sodержaniem domennogo shlaka]. Cem. Concr. Compos. 2005; 27: 7-8.*
18. J. Minet, S. Abramson, B. Bresson, A. Franceschini, H. Van Damme, N. Lequeux. *Organic calcium silicate hydrate hybrids: a new approach to cement based nanocomposites [Gibridy organicheskogo gidrosi-likata kal'ciya: novyj podhod k nanokompozitam na osnove ce-menta]. J Mater Chem. 2006; 16:1379-1383.*
19. A. Franceschini, S. Abramson, V. Mancini, B. Bresson, C. Chassenieux, N. Lequeux. *New covalent bonded polymer–calcium silicate hydrate composites [Novye kovalentno-svyazannye kompozity polimer-gidrosilikata kal'ciya]. J Mater Chem. 2007; 17:913-22.*
20. H. Matsuyama, J.F. Young. *Intercalation of polymers in calcium silicate hydrate: a new synthetic approach to biocomposites? [Vvedenie poli-merov gidrosilikata kal'ciya: novyj sinteticheskij podhod k biokompozitam.] Che Mater. 1999; 11:16-19.*
21. Gorelyshev N.V. *Asfal'tobeton i drugie bitumomineral'nye materialy / N.V. Gorelyshev. – Mozhajsk-Terra, 1995. –176 c.*

22. Patent RK na poleznuyu model'. Konstrukciya dorozhnoj odezhdy na osnove nanomodificirovannogo betona / Asmatulaev B.A. Asmatulaev R.B., Chumachenko V.I. i dr. / Ministerstvo yusticii RK. Nur-Sultan, 2019. – Byul. №26. – S.4.

.....
**NANO-MODIFIED SLOWLY HARDENING ROAD CONCRETES
FOR DURABLE ROADS**

*Doctor of Engineering, Professor B.A. Asmatulaev,
Ph. D. (Economy) R.B. Asmatulaev,
Post-graduate student N.B. Asmatulaev,
Engineer A.E. Oshanov,
Engineer R.A. Mazgutov,
(KazNIPI Dortrans LLP, Kazakhstan)
Contact information: boris-aisa@mail.ru;
ruslan_asmatulayev@mail.ru;
activ-cz@mail.ru;
almazoshanov@mail.ru;
mazgutov_r@mail.ru*

At the beginning of the century, new requirements have been raised for perpetual road pavements according to modern concepts of the USA and the EU. The article considers the basic experimental and practical studies of “self-healing road concretes”, which were first developed in Kazakhstan and meet these requirements. The durability of road concretes is justified by the results of physico-chemical studies of the structure of belite cement stone and physico-mechanical tests of various compositions of concretes and core samples from roads. The strength of concrete continues to increase for over 40 years. It is assumed that the way to durable “Roman concretes” has been found.

Key words: *durability, road concretes, physical and chemical studies, cement stone, structure, physical and mechanical tests, strength.*

Рецензент: канд. техн. наук. Б.П. Кутько (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 06.09.2020 г.