

Key words: freight car, undercarriage, trolley, cast parts, cracks, fractures.

УДК 661.631.002.68(574)

АСМАТУЛАЕВ Б.А. – д.т.н., профессор, Академический советник НИА РК (г. Алматы, ТОО «НИиПК Каздоринновация»)

СИЛЬЯНОВ В.В. – д.т.н., профессор (г. Москва, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет)

АСМАТУЛАЕВ Р.Б. – к.т.н., академик ИТА (г. Алматы, ТОО «НИиПК Каздоринновация»)

АСМАТУЛАЕВ Н.Б. – докторант PhD

ПРИМЕНЕНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ШЛАКОМИНЕРАЛЬНЫХ БЕТОНОВ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Аннотация

Статья посвящена применению дорожных наноструктурированных шлакоминеральных бетонов для строительства автомобильных дорог. Шлаковый наноструктурированный белитовый цемент получен из гранулированного шлака с добавкой активатора. Исследованы оптимальные составы белитовых цементов с проведением физико-механических испытаний и физико-химических исследований цементов и бетонов. Исследованиями установлено, что гидросиликаты кальция C-S-H являютсяnano размерными новообразованиями в структуре шлакового цементного камня и обладают свойствами коллоидной системы упрочнения. Подтверждены высокотехнологичные свойства при строительстве и многолетнее упрочнение шлакоминеральных бетонов при эксплуатации дорог. Рекомендовано использование шлакоминеральных бетонов при круглогодичном дорожном строительстве, в том числе при низких и отрицательных температурах.

Ключевые слова: шлакоминеральные бетоны, белитовые наноструктурированные цементы, физико-механические испытания, химико-минералогические исследования, круглогодичное строительство дорог.

Введение. 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. 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. 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 [1]. В связи с выдвинутыми концепциями, основными условиями долговечности дорог по концепциям США и Европейских стран, приведены в порядке их значимости:

1. обеспечение комфорта и безопасности транспортного движения по дорогам;
2. устойчивость дорог под действием транспортных перевозок и 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, является увеличение срока службы дорог до 50 и более лет.

Долговечность дорог, которое обобщается концепцией «вечных дорог» (в США) или «дорог с большой продолжительностью жизни» (в Европе), с обновлением каждые 6-7 лет верхнего слоя. Второе и третье направления взаимоувязаны: энергосберегающие, экологически чистые технологии, с повторным использованием всех материалов реконструируемых дорог, не менее актуально для высокоматериалоемкого дорожного строительства [2]. Кроме того, в Казахстане накоплено в отвалах огромная сырьевая база техногенных минеральных отходов (далее ТМО), пригодных для дорожного строительства, в которых накоплено порядка 45 млрд. тонн, при этом наблюдается тенденция их ежегодного роста на 700-800 млн. тонн.

Основные результаты работы.

Мировой опыт показывает, что одним из экономически и экологически целесообразных направлений переработки промышленных отходов является их использование для получения различных дорожно-строительных материалов [2-3]. В отечественной и зарубежной практике строительства автомобильных дорог все большее применение находят основания и покрытия из грунтов и каменных материалов, обработанных различными минеральными вяжущими. В качестве основного компонента такого вяжущего могут использоваться электротермофосфорные гранулированные (ЭТФГ) шлаки, которые являются отходами предприятий фосфорной промышленности. Вяжущие свойства у ЭТФГ шлаков проявляются при их обработке различными щелочными активаторами [4]. Одним из таких активаторов является цементная пыль вторичного улавливания – отход цементных заводов. Эффективность применения цементной пыли в качестве активатора обусловлена наличием в ее составе оксидов различных щелочных металлов. Цементная пыль является недефицитным материалом и улавливается воздушными фильтрами в больших объемах на цементных заводах и обратно не возвращается из-за высокого содержания щелочей. В районах размещения шлаковых отвалов предприятий фосфорной промышленности находятся несколько цементных заводов: Кантский, Шымкентский, Сас-Тобинский и другие.

Важное практическое значение для увеличения темпов дорожного строительства в Республике Казахстан имеет перспектива применения шлакоминеральных вяжущих при круглогодичном строительстве автомобильных дорог [3-4]. Положительным свойством шлакоминеральных вяжущих является их способность твердеть при отрицательных температурах, не разрушаться под действием мороза и приобретать необходимые прочностные и деформативные характеристики в весенне-летний период. Для строительства долговечных монолитных оснований, впервые в Казахстане разработаны составы медленнотвердеющих белитовых цементов и освоено применение долговечных «самовосстанавливающихся дорожных бетонов», в том числе с использованием грунтовых оснований «Жертас», на которые получены патенты Республики Казахстан на изобретения [6-9].

Экспериментальная часть.

Методика физико-химического исследования состава и свойств шлакоминерального вяжущего.

Исследование ЭТФГ шлаков Новоджамбулского фосфорного завода ТОО «Казфосфат» включало определение химического и минералогического составов проб шлака, взятых с отвалов предприятия в осенне-зимний период 2018-2019 г.г. На всех точках пробоотбора определены координаты с помощью портативного спутникового навигатора GPS Garmin Oregon. Интерпретация данных по отбору проб гранулированного

шлака проводилась с помощью программного обеспечения MapInfo 9.0 путем построения векторных карт с указанием координат точек отбора проб.

Количественный химический анализ проб исходного ЭТФГ шлака выполнен по стандартным методикам с использованием спектрального, спектрофотометрического, потенциометрического, комплексонометрического, гравиметрического, титриметрического, атомно-адсорбционного методов анализа.

Анализ полученных результатов показал, что при отборе проб в разное время года и в разных точках химический состав ЭТФГ шлака не меняется, что подтверждает однородность материала. Содержание в шлаке основных оксидов находится в следующих пределах, масс. %: SiO_2 39-43; CaO 45-51; Al_2O_3 1-3; Fe_2O_3 0,4-0,5; MgO 2-4; SO_3 0,1-1; P_2O_5 1-3; F 2-3.

Составы изученных проб ЭТФГ шлака соответствуют требованиям, предъявляемым нормативным документом СТ РК 935-92 «Шлаки электротермофосфорные гранулированные для производства цементов».

Возможность использования ЭТФГ шлака в производстве дорожных строительных материалов устанавливается на основании всестороннего изучения фазово-минералогического состава шлакоминеральных смесей.

Дифференциально-термический анализ (ДТА) проводили на дериватографе Q-1000/D (Венгрия). Съемка осуществляется в воздушной среде, в диапазоне температур 20-град

1000 °C, режим нагрева – динамический ($dT/dt = 10 \text{ мин}^{-1}$), эталонное вещество – прокаленный Al_2O_3 , навеска образца – 500 мг.

Минералогический состав изучен по данным рентгенофазового анализа, выполненного на автоматизированных дифрактометрах X PertPro (Нидерланды) и ДРОН-4 (Россия) с $Cu_{K\alpha}$ – излучением (β -фильтр) по дифрактограммам порошковых проб с применением метода равных навесок и искусственных смесей. Интерпретация дифрактограмм проводилась с использованием данных картотеки ASTM Powder diffraction file и дифрактограмм чистых от примесей минералов.

Приготовление вяжущего осуществляли путем совместного помола ЭТФГ шлака с добавкой цементной пыли в количестве (3; 6; 9; 18%). Измельчение смесей проводили в лабораторной шаровой мельнице до тонкости, характеризуемой остатком на сите 0,08 мм не более 15% и до удельной поверхности не менее 3000 $\text{cm}^2/\text{г}$. Перед помолом ЭТФГ шлак высушивали до постоянной массы при температуре, не превышающей 200 °C.

Приготовление образцов для определения прочностных свойств шлакового вяжущего осуществляли путем прессования вяжущего при оптимальной влажности, что более реально отражает условия его прессования катками в жестких дорожных смесях при строительстве основания автомобильной дороги.

Изучение прочностных и деформативных характеристик шлакового вяжущего проводили на образцах-балочках размером 40x40x160 мм и цилиндрах диаметром и высотой – 50 мм. Формовка образцов проводилась путем уплотнения на прессе в металлических формах под нагрузкой 20 МПа и временем ее приложения в течение 3-х мин.

Хранение образцов до испытания осуществляли при нормальных условиях во влажной среде, для этого образцы помещали в ванну с гидравлическим затвором при температуре 20 + 2 °C. Время твердения образцов в различных температурных условиях составляло 1; 3; 9; 12; 15 месяцев.

При изучении влияния низких положительных температур (+5 °C) и небольших отрицательных температур (от 0 °C до -10 °C) на свойства шлакового вяжущего в процессе его твердения, часть образцов выдерживали в холодильных камерах. При этом проводили испытания по двум температурным режимам с учетом имитирования технологии строительства: а) перед помещением образцов в холодильные камеры их

предварительно выдерживали в течение 1 месяца в нормальных условиях; б) без предварительной выдержки образцов в нормальных условиях.

При хранении образцов в холодильных камерах их обертывали в полиэтиленовую пленку, для исключения вымораживания влаги из образцов, необходимого для протекания процессов гидратации вяжущего. Перед испытанием образцы размораживали в течение не менее 4-х часов во влажном песке.

После испытания на прочность из середины образцов отбирали пробы для изучения физико-химических процессов, происходящих при твердении шлакового вяжущего. Исследование изменения фазового состава новообразований, возникающих в процессе твердения шлакового вяжущего, проводили в зависимости от сроков и условий твердения, а также состава вяжущего.

Результаты и обсуждение.

В ряде работ отмечается, что строительство дорог с использованием медленнотвердеющих 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 суток в нормальных условиях. На рисунках 1 показаны результаты испытания серии образцов 5, 6, 7, 8 в сравнении с серией 2, постоянно твердевших в нормальных условиях. 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 °C (серия 5) возросла при сжатии на 33%, изгибе – на 38%, а при 0 °C (серия 6) всего лишь соответственно на 22 и 20%. При температуре -5 °C (серия 7) и -10 °C (серия 8) практически роста прочности не наблюдается, а отмечается даже некоторое снижение ее.

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 прочности при изгибе свидетельствует о повышении дисперсности новообразований, что приводит к улучшению деформативных свойств структуры цементного камня. При положительных температурах в ваннах с гидрозатвором или в нормальных условиях, цементный камень набирает прочность в течение 2-3 лет, а в дальнейшем прочность стабилизируется. Прочность на сжатие достигает 130 МПа, а на растяжение при изгибе до 10,7-12 МПа, что свидетельствует о высоких прочностных и деформативных свойствах белитовых цементов. 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 [10].

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 ошибке, равной Зσ.

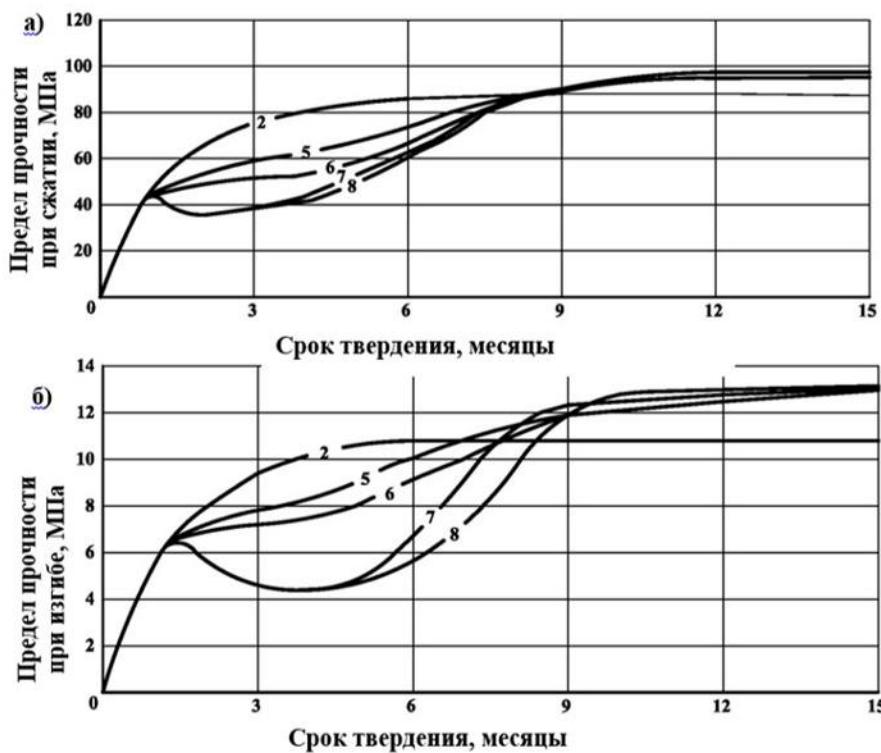


Рисунок 1 – Кинетика изменения прочности белитового цементного камня, во времени, предварительно выдержаных 1 месяц при нормальных условиях, затем 5 месяцев: 5, 6, 7 и 8 – соответственно при температурах: +5 °C; 0 °C; -5 °C и -10 °C, с последующим твердением в нормальных условиях, в сопоставлении с образцами: 2 – постоянного твердения в нормальных условиях: а) - прочность на сжатие, б) - прочность на растяжение при изгибе.

Прочность образцов на сжатие и растяжение при изгибе определялась в соответствии с требованиями ГОСТ 18105.2 и ГОСТ 10180, морозостойкость бетона – по методике, изложенный в ГОСТ 10060.4, и модуль упругости – в соответствии ГОСТ 24452. Результаты испытаний различных составов дорожных бетонов, изображенные на рисунке 2 подтверждают о длительном росте прочности бетонов на сжатие в течение 2-х лет. На рисунке 3 показаны фактическое увеличение прочности на сжатие шлакобетонных оснований в процессе эксплуатации опытных участков дорог, с 1976-1984 г.г. до 2016 г. Кривые снизу-вверх; шлакобетоны с начальной проектной маркой 100, 150 и 200 в возрасте 90 суток, с дозой вяжущего 10, 12 и 15% по массе бетонной смеси с заполнителем из гравийно-песчаной смеси.

Фактическое многолетнее упрочнение шлакобетонных оснований в процессе эксплуатации дорог подтверждает коллоидную структуру твердения шлакобетонов, обладающих свойствами: длительной тиксотропии – самовосстановления после незначительных деструкций и реопексии – упрочнение при действии транспортных и температурных нагрузок.



Рисунок 2 – Кинетика набора прочности дорожного бетона (ГПС) во времени от количества белитового цемента, где 1; 2; 3; 4; 5 и 6 – соответственно 5; 10; 15; 20; 25 и 30 мас.% цемента с содержанием белита C_2S – 75-80%.

В соответствии с современными взглядами на теорию твердения вяжущих веществ [10], взаимодействие воды с частицами вяжущего начинается с адсорбции ее молекул на поверхности фаз и обуславливает образование первичных гидратных новообразований, как на поверхности частиц, так и в пространстве между зернами. На поверхности частиц в начальной стадии твердения образуется гелевая пленка из гидратов, включающая гидросиликат кальция $C-S-H$ (I). В процессе гидролиза первичных гидратов, растворения безводных соединений и диффузии растворенных веществ в пространство между зернами, создаются условия для их взаимодействия. При этом образуются внешние гидросиликаты кальция, которые кристаллизуются в виде длинных волокон и игл. В конечном результате формируется гелевидная структура цементного камня.

Рентгеноструктурный анализ проб исходного ЭТФГ шлака показал, что материал всех проб на 98% находится в структурно-аморфном состоянии (таблица 1).

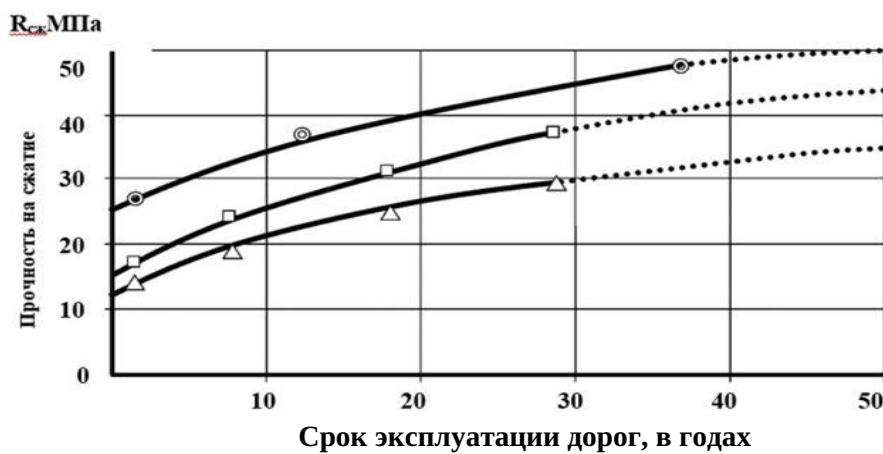


Рисунок 3 – Фактическое изменение прочности шлакобетонных оснований опытных участков дорог, с 1976-1984 г.г. до 2016 г. Кривые снизу-вверх; шлакобетоны с начальной проектной маркой 100, 150 и 200 в 90 суток.

В таблице 2 представлены рентгенограммы образцов шлакоминерального вяжущего, твердевшего в течение 3-х месяцев в нормальных условиях и содержащего в своем составе ЭТФГ шлак и цементную пыль (3; 6; 9; 18%). На рентгенограммах образцов вяжущего наблюдаются линии, отвечающие межплоскостным расстояниям (1,815; 2,008;

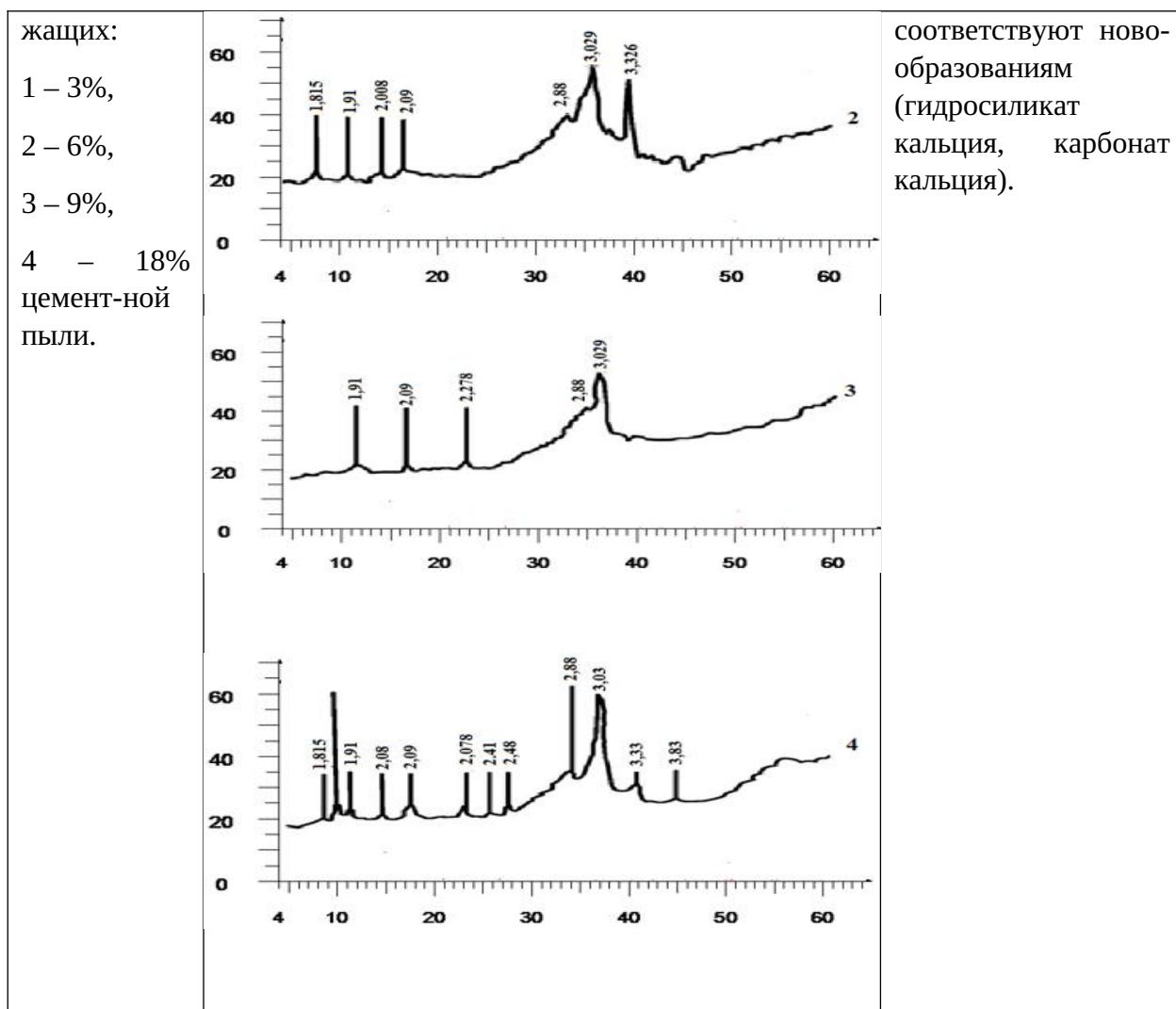
2,48; 3,33; 3,83 Å°), характерным для исходного ЭТФГ шлака. Кроме линий шлака на рентгенограммах присутствуют линии, соответствующие межплоскостным расстояниям: 1,860; 1,906; 2,09; 2,278; 3,029 Å°, отвечающие новообразованному карбонату кальция (кальцит). Образование кальцита может происходить за счет карбонизации компонентов, содержащихся в составе цементной пыли. О наличии гелевидных новообразований гидросиликата кальция C-S-H (I) свидетельствует линия с межплоскостным расстоянием 3,029 Å°.

Таблица 1 – Рентгенофазовый анализ проб ЭТФГ шлака

Наименование	Рентгенограммы проб. Излучение $Cu_{K\alpha}$	Описание результатов
Исходный ЭТФГ шлак	<p>The figure shows an X-ray diffraction (XRD) pattern for EFG slag. The vertical axis represents intensity from 0 to 60, and the horizontal axis represents the diffraction angle 2θ from 4 to 60 degrees. Several sharp peaks are labeled with their corresponding Miller indices: $d=3,34440$, $d=2,9$, $d=2,64466$, $d=2,21360$, $d=1,64398$, and $d=1,49569$. The pattern is characteristic of an amorphous matrix with some crystalline phases.</p>	<p>Материал пробы находится в аморфном состоянии. Дифракционные рефлексы – диффузное гало. В излучении Со– K_{α} угловой интервал «гало» по 2θ (29-42° с $\max \approx 34^{\circ}$). Слабое присутствие рефлекса $d = 4,92\text{ \AA}$ идентифицировано, как принадлежащее портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$.</p>

Таблица 2 – Рентгенофазовый анализ проб шлакоминерального вяжущего

Наименование	Рентгенограммы проб. Излучение $Cu_{K\alpha}$	Описание результатов
Рентгенограммы образцов шлаково- го вяжу- щего 3-х месячно- го тверде- ния в нормаль- ных усло- виях, содер-	<p>The figure shows an XRD pattern for a slag-mineral bonding agent. The vertical axis represents intensity from 0 to 60, and the horizontal axis represents the diffraction angle 2θ from 4 to 60 degrees. Several sharp peaks are labeled with their corresponding Miller indices: 1,91, 2,278, 2,83, 3,029, and 3,33. The pattern shows more defined peaks compared to the EFG slag, indicating crystallization.</p>	<p>На рентгенограммах образцов шлакоминерального вяжущего линии: 1,815; 2,008; 2,48; 3,33; 3,83 Å° соответствуют исходному ЭТФГ шлаку.</p> <p>Линии: 1,860; 1,906; 2,09; 2,278 и 3,029 Å°</p>



Таким образом, при твердении шлаковых вяжущих в нормальных условиях происходит образование гелевидных масс и слабо закристаллизованных продуктов гидратации. Основными связующими новообразованиями в белитовых шлаковых вяжущих являются гелевидные новообразования пластинчатые гидросиликаты кальция С-S-H (I), имеющие по толщине и ширине пластин нано размерные величины, соответственно 2-3 НМ и 30-50 НМ. При этом удельная поверхность гидросиликатов кальция С-S-H (I) составляет более 4 000 000 см² / гр. [10-18]. Поэтому структуру твердеющих белитовых шлаковых вяжущих можно отнести к наноструктурированным.

Повышенная дисперсность таких новообразований приводит к увеличению контактных связей между ними через тонкие пленки воды, что обуславливает получение высоких прочностных и деформативных связей между частицами шлакового вяжущего. Эти выводы подтверждаются также результатами проведенного термографического и микроскопического анализов, которые не приводятся из-за ограничений требований публикаций.

Результаты изучения кинетики изменения содержания прочно связанной воды в процессе твердения шлакового вяжущего представлены на рисунке 4. Как видно, из приведенных данных, с увеличением времени твердения образцов от одного до трех месяцев количество прочно связанной воды непрерывно повышается, что свидетельствует о росте степени гидратации вяжущего в первые три месяца. Затем этот процесс замедляется. Образцы вяжущего с содержанием 9 и 18% цементной пыли при твердении в

течение трех и девяти месяцев практически не отличается по количеству прочно связанной воды. Оптимальным количеством активатора считаем 9-10% (рисунок 4).

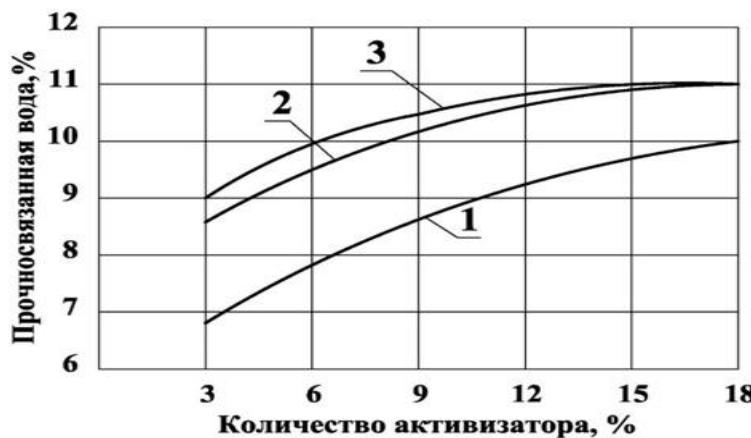


Рисунок 4 – Кинетика изменения содержания прочно связанной воды в процессе твердения шлакового вяжущего при нормальных условиях: 1 – образцы, твердевшие 1 месяц; 2 – соответственно 3 месяца; 3 – соответственно 9 месяцев.

Следующим этапом исследований было изучение процессов твердения шлакоминерального вяжущего при отрицательных температурах. Кинетики изменений прочности (рисунки 1 и 2) и количества прочносвязанной воды (рисунок 4) 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 (рисунок 1) сопровождается вытеснением прочносвязанной воды (рисунок 4) из волокнистых пластинчатых 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 до одного месяца. Дальнейшее выдерживание при нормальных условиях в течение трех месяцев прочность и количество прочносвязанной воды превышает проб нормального твердения. Это свидетельствует об углублении процессов гидратации зерен цемента и повышении дисперсности новообразований при низких температурах выдерживания (рисунок 5), что также повышает прочность цементного камня. Это свидетельствует о подтверждении коллоидной системы твердения цементного камня, обладающего свойствами: тиксотропии – самовосстановления количества отжатой влаги из капилляров и реопексии – дополнительного повышения количества прочно связанной влаги, от действия низких и отрицательных температур.

На рисунке 5 представлены результаты рентгенофазового анализа образцов вяжущего, содержащих 6% цементной пыли. Образцы предварительно выдерживали в течение одного месяца при нормальных условиях, а затем они твердели в течение 3-х месяцев при температурах +5 °C; 0 °C; -5 °C; -10 °C. На рентгенограммах всех проб (таблица 2; рисунок 6), независимо от температуры твердения, значения межплоскостных расстояний остаются постоянными. Это свидетельствует о стабильном фазовом составе новообразований, возникающих в процессе твердения шлакоминерального вяжущего при нормальных условиях и при низких температурах.



Рисунок 5 – Кинетика изменения количества прочносвязанной воды в белитовом цементном камне в процессе твердения при различных температурах, где 2 – постоянно в нормальных условиях, 5, 6, 7 и 8 – в начале один месяц в нормальных условиях, затем три месяца при температурах +5, 0, -5 и -10 °C и опять в нормальных условиях.

Таким образом, из всех теорий твердения минеральных вяжущих, можно выделить коллоидно-химическую теорию В.Михаэлиса, которая, очевидно будет более приближенной для обоснования твердения белитовых шлаковых цементов.

Наблюдаемые процессы твердения шлакоминеральных материалов при низких температурах, по-видимому, обусловлены тем, что при их твердении не вся вода переходит в лед при понижении температуры ниже 0 °C (рисунок 6). Это объясняется тем, что вода в таких системах представляет собой раствор солей и щелочей, имеющий более низкую температуру замерзания. Вода находится в очень тонких порах и капиллярах и испытывает со всех сторон действие электромолекулярных сил минеральной поверхности, поэтому в этом случае переход воды в лед затруднен.

Как уже отмечалось, в процессе взаимодействия воды с компонентами шлакового цемента возникают коллоидные гелевые новообразования, которые повышают степень гидратации твердеющего вяжущего при низких температурах и тем самым повышают прочность материалов. В отличие от обычного цемента шлаковые вяжущие обладают способностью к медленному твердению, особенно при низких температурах, что создает благоприятные условия для их использования при круглогодичном дорожном строительстве. При этом конечная прочность шлакоминеральных материалов, укладываемых в зимнее время, не отличается от прочности материала при нормальных условиях твердения.

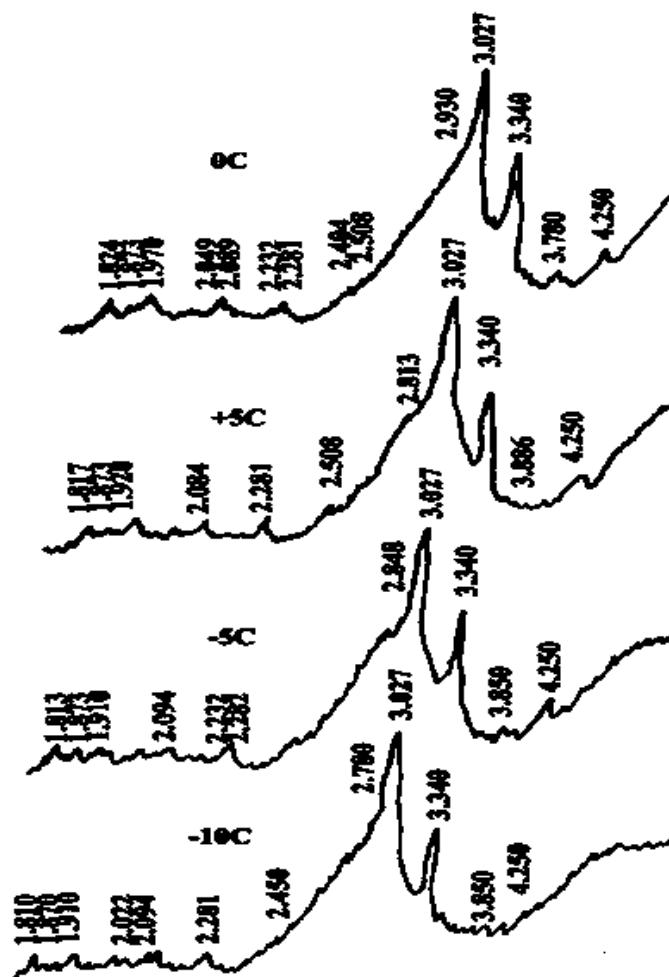


Рисунок 6 – Рентгенограммы шлакового цемента, твердевшего в течение трех месяцев при температурах $+5^{\circ}\text{C}$, 0°C , -5°C , -10°C .

Выводы. Исследование фазового состава продуктов твердения фосфорных гранулированных шлаков, активизированных цементной пылью, позволяют сделать следующие выводы:

- 1) Добавки цементной пыли не изменяют фазового состава новообразований, а лишь ускоряют процесс гидратации вяжущего.
- 2) Основная масса новообразований представлена в виде гелевидной массы гидросиликатов кальция нано размерных величин и кремнезема в смеси с тонкодисперсным кальцитом.
- 3) С увеличением времени твердения и добавок цементной пыли количество гелевидной массы и гидросиликатов кальция типа C-S-H (I) увеличивается, причем более интенсивно это происходит в первые 3 месяца.
- 4) Значительное содержание в твердеющей системе тонкодисперсных гелевидных новообразований обуславливает получение высоких прочностных и деформативных свойств шлакоминеральных вяжущих, которые необходимо отнести к наноструктурированных цементам или вяжущим.
- 5) Процесс твердения наноструктурированного шлакоминерального вяжущего при отрицательных температурах сопровождается образованием материалов с высокими прочностными характеристиками.

6) Наноструктурированные шлакоминеральные вяжущие относятся к медленно твердеющим цементирующим веществам в широком интервале температур, что позволяет использовать их при круглогодичном дорожном строительстве.

7) Результаты испытаний различных составов дорожных бетонов, на опытных участках дорог подтверждают о длительном упрочнении бетонов в течение более 40 лет.

Литература

1. Радовский Б.С. Концепция вечных дорожных одежд. Каталог-справочник: Дорожная техника. – 2011. – С. 120-132.
2. Асматулаев Б.А. Применение дорожных бетонов из медленно твердеющих вяжущих в строительстве дорожных одежд с усовершенствованными покрытиями в Казахстане. / Сборник МАДИ. – 2009. – С. 29-33.
3. Асматулаев Б.А., Шейнин А.М., Чумаченко В.И. и др. Укатываемый бетон на основе шлакового вяжущего // Автомобильные дороги. – 1993. – № 9. – С. 18-20.
4. Исаев В.С., Еркина Н.А., Юмашев В.М., Васильев Ю.М., Саль А.О., Асматулаев Б.А. Методические рекомендации по строительству оснований и покрытий из щебеночных, гравийных и песчаных материалов, обработанных неорганическими вяжущими. – М.: Минтрансстрой СССР, СоюздорНИИ, 1985. – 150 с.
5. Асматулаев Б.А., Асматулаев Р.Б., Шестаков В.Н. Теория и практика инновационных технологий в дорожном строительстве Казахстана. / Материалы Международной 66-й научно-практической конференции СибАДИ, Омск. – 2012. – Кн. 1. – С. 33-38.
6. Асматулаев Б.А. и др. Инновационный патент РК № 29852 «Самовосстанавливющийся дорожный бетон». Приоритет установлен 27.12.2013 года. Министерство юстиции РК. Опубл. 15.05.15. Бюл. № 5. Астана, 2015.
7. Абланов Б.Ф., Белоусов Б.В., Асматулаев 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.
8. Асматулаев Б.А., Асматулаев Р.Б., Чумаченко В.И., Асматулаев Н.Б. и др. Конструкция дорожной одежды на основе наномодифицированного бетона. Патент РК на полезную модель. Министерство юстиции РК. Бюл. №26. Нур-Султан, 2019. – С. 4.
9. Асматулаев Б.А., Асматулаев Р.Б., Турсумуратов М.Т., Амирханов Ж.А., Жеребитский М.И., Искандаров Т.Р. Комплексный состав грунтовых оснований для дорожного и аэродромного строительства «Жертас». Патент РК № 24251. Опубл. 15.07.2011. Бюлл.№ 7.
10. Тейлор Х.Ф. Гидросиликаты кальция. / В книге: «Химия цемента». – М.: Стройиздат, 1969. – С. 17-18.
11. 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 P.J.M., 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.
12. 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 характеристик и моделирование пор и поверхностей в цементном тесте: сопоставление обработки и свойств]. J. Adv. Concr. Technol. 2008; 6(1): 5-29.
13. F. Sanchez, A. Borwankar Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cementbased 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): 3151-8.

14. K.P. Chong, E.J. Garboczi. Smart and designer structural material systems [Интеллектуальные и проектирующие системы конструкционных материалов]. Prog. Struct.Mat.Eng.2002; 4:417-30.16. E.J. Garboczi, D.P. structure of calcium silicate hydrate [Растворимость и структура гидросиликата кальция]. Cem Concr Res 2004; 34(9): 1499-519.

15. 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): 848-53.

16. 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 нанокомпозитам на основе цемента]. J. Mater Chem 2006; 16: 1379-83.

17. 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; 17:913-22.

18. 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]. J Chem 2007; 17: 913-42.

References

1. Radovsky B.S. The concept of eternal road clothes. Directory-reference: Road equipment. – 2011. – pp. 120-132.
2. Asmatulaev B.A. The use of road concrete from slowly hardening binders in the construction of road clothing with improved coatings in Kazakhstan. / Collection of MADI. – 2009. – pp. 29-33.
3. Asmatulaev B.A., Sheinin A.M., Chumachenko V.I., etc. Ukatyvaemyy concrete on the basis of a slag binder // Avtomobilnye dorogi. – 1993. – No. 9. – pp. 18-20.
4. Isaev V.S., Yerkin N.A., Yumashev V.M., Vasiliev J.M., Sall A.O., Asmatulaev B.A. Methodological recommendations for the construction of bases and coatings made of crushed stone, gravel and sand materials treated with inorganic binders. – Moscow: Mintransstroy of the USSR, Soyuzdornii, 1985. – 150 p.
5. Asmatulaev B.A., Asmatulaev R.B., Shestakov V.N. Theory and practice of innovative technologies in road construction in Kazakhstan. / Proceedings of the International 66-th scientific and practical conference SibADI, Omsk. – 2012. – Book 1. – pp. 33-38.
6. Asmatulaev B.A. et al. Innovative patent of the Republic of Kazakhstan No. 29852 "Self-healing road concrete". The priority was set on 27.12.2013. Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan. Publ. 15.05.15. Byul. no. 5. Astana, 2015.
7. Aslanov B.F., Belousov B.V., Asmatulaev B.A. Investigation of the material composition and kinetics of hardening of a binder based on phosphoric slag. // In the collection: "Questions of metallogeny, material composition and geological structure of deposits of Kazakhstan", Almaty. – 1978. – vol. 13. – pp. 69-75.
8. Asmatulaev B.A., Asmatulaev R.B., Chumachenko V.I., Asmatulaev N.B., etc. Construction of road surface based on nanomodified concrete. Patent of the Republic of Kazakhstan for a utility model. Ministry of Justice of the Republic of Kazakhstan. Byul. No. 26. Nursultan, 2019. – p. 4.
9. Asmatulaev B.A., Asmatulaev R.B., Tursumuratov M.T., Amirkhanov Zh.A., Zherebitskiy M.I., Iskandarov T.R. Complex composition of ground bases for road and airfield construction "Zhertas". Patent of the Republic of Kazakhstan No. 24251. Published on 15.07.2011. Byull. No. 7.

10. Taylor H.F. Calcium hydrosilicates. / In the book: "Chemistry of cement". – M.: Stroyizdat, 1969. – pp. 17-18.
11. F. Sanchez, L. Zhang, C. Ince Multi-scale performance and durability of carbon nanofiber / cement composites. In: Bittnar Z., Bartos PJ.M., 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.
12. 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. *J. Adv. Concr. Technol.* 2008; 6(1): 5-29.
13. F. Sanchez, A. Borwankar Multi-scale performance of carbon microfiber reinforced cementbased composites exposed to a decalcifying environment. *Mater. Sci. Eng. A* 2010; 527(13-14): 3151-8.
14. K.P. Chong, E.J. Garboczi Smart and designer structural material systems. *Prog. Struct. Mat. Eng.* 2002; 4:417-30.16. E.J. Garboczi, D.P. structure of calcium silicate hydrate. *Cem Concr Res* 2004; 34(9): 1499-519.
15. K. Sobolev Mechano-chemical modification of cement with high volumes of blast furnace slag. *Cem. Concr. Compos.* 2005; 27(7-8): 848-53.
16. 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. *J. Mater Chem* 2006; 16: 1379-83.
17. A. Franceschini, S. Abramson, V. Mancini, B. Bresson, C. Chassenieux, N. Lequeux New covalent bonded polymer-calcium silicate hydrate composites. *J. Mater. Chem.* 2007; 17:913-22.
18. H. Matsuyama, J.F. Young Intercalation of polymers in calcium silicate hydrate: a new synthetic approach to biocomposites. *J Chem* 2007; 17: 913-42.

АСМАТУЛАЕВ Б.А. – т.ғ.д., профессор, ҚР ҮИА академиялық кеңесшісі (Алматы қ., «НИиПК Каздоринновация» ЖШС)

СИЛЬЯНОВ В.В. – т.ғ.д., профессор (Мәскеу қ., Мәскеу автомобиль-жол мемлекеттік техникалық университеті)

АСМАТУЛАЕВ Р.Б. – т.ғ.к., ITA академигі (Алматы қ., «НИиПК Каздоринновация» ЖШС)

АСМАТУЛАЕВ Н.Б. – докторант PhD

АВТОМОБИЛЬ ЖОЛДАРЫН САЛУ КЕЗІНДЕ НАНОҚҰРЫЛЫМДЫ ШЛАК-МИНЕРАЛДЫ БЕТОНДАРДЫ ҚОЛДАНУ

Аңдатпа

Мақалада автокөлік жолдарын салу үшін наноқұрылымды қожс-минералды бетондарын пайдалануға арналған. Шлак наноқұрылымды белит цементтің активатор қосып түйіршіктелген қождан алады. Белит цементтерінің оңтайлы құрамдары физикалық-механикалық сынақтармен және цементтер мен бетондарды физико-химиялық зерттеулермен зерттелді. Зерттеулер C-S-H кальций гидросиликаттарының қожды цемент тасының құрылымындағы нано өлшемді жаңа түзілімдер болып табылатынын және коллоидтық қатаю жүйесінің қасиеттері бар екенін анықтады.

Құрылымдың көзіндегі жоғары технологиялық қасиеттері және жолды пайдалану көзіндегі қожс-минералды бетондардың ұзақ уақыт қатауы расталды. Қожс-минералды бетондарды жыл бойына, оның ішінде төменгі және аязды температураларда жол салу үшін пайдалану ұсынылады.

Түйінді сөздер: минералды-қожды бетондар, белиттік наноқұрылымды цементтер, физикалық-механикалық сынақтар, химиялық және минералогиялық зерттеулер, жыл бойына жол салу.

ASMATULAEV B.A. – d.t.s., professor, Academic advisor of NIA RK (Almaty, TOO "NIPC Kazroadinnovation")

SILYANOV V.V. – d.t.s., professor (Moscow, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University)

ASMATULAEV R.B. – k.t.s., academician of the ITA (Almaty, TOO "NIPC Kazroadinnovation")

ASMATULAEV N.B. – PhD student

APPLICATION OF NANOSTRUCTURED SLAG-MINERAL CONCRETE IN THE CONSTRUCTION OF HIGHWAYS

Abstract

The article is devoted to the use of road nanostructured slag-mineral concretes for the construction of highways. Slag nanostructured belite cement is obtained from granulated slag with the addition of an activator. Optimal compositions of belite cements were investigated with physical and mechanical tests and physicochemical studies of cements and concretes. Studies have established that calcium hydrosilicates C-S-H are nano-sized new formations in the structure of slag cement stone and have the properties of a colloidal hardening system. ... High-tech properties during construction and long-term hardening of slag-mineral concretes during road operation have been confirmed. The use of slag-mineral concretes is recommended for year-round road construction, including at low and negative temperatures.

Key words: mineral slag concretes, belite nanostructured cements, physical and mechanical tests, chemical and mineralogical studies, year-round road construction.

УДК 656.2

АХМЕТОВ Б.С. – д.т.н., профессор (г. Алматы, Казахский университет путей сообщения)

АБУОВА А.Х. – доктор PhD (г. Алматы, Казахский университет путей сообщения)

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Аннотация

Для минимизации последствий чрезвычайных ситуаций в условиях стремительного роста информационных потоков и дефицита времени встает необходимость в создании четко выстроенной системы автоматизированного оперативного информационно-аналитического обеспечения анализа обстановки, выработки и принятия решений по управлению реагированием на чрезвычайных ситуациях с широким применением современной компьютерной техники, информационных технологий и систем поддержки