

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И
ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ / DESIGN AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRFIELDS,
BRIDGES AND TRANSPORT TUNNELS**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.82>

ДОРОЖНЫЕ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ ЗОЛОЩЕЛОЧНОГО ВЯЖУЩЕГО

Научная статья

Воронин К.М.¹, Трубкин И.С.², Трубкина И.В.^{3,*}, Пурис А.В.⁴

^{1, 2, 3, 4} Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (tiv-mgn[at]mail.ru)

Аннотация

В работе была выявлена возможность использования этtringитового, золощелочного вяжущих для приготовления дорожных одежд. Показана возможность использования золощелочного бетона на основе золы гидроудаления ТЭЦ при производстве основного бетонного несущего слоя и этtringитового вяжущего для укрепления щебеночного основания автомобильных дорог. Разработан состав бетона на этtringитовом вяжущем для укрепления оснований дорог, а также разработан состав на золощелочном вяжущем для основания дорог. Определены их физико-механические свойства, которые соответствуют требованиям для подобной смеси на основе традиционных вяжущих (типа портландцемент). Установлена эффективность применение разработанных вяжущих в устройстве дорожных одежд.

Ключевые слова: зола ТЭЦ гидроудаления, твердение, растворимое стекло, прочность, гидросиликаты кальция, этtringит, бетон для дорожных одежд, золощелочное вяжущее, гидратация, ларнит.

ROAD CONCRETES BASED ON GOLD-ALKALI BINDER

Research article

Voronin K.M.¹, Trubkin I.S.², Trubkina I.V.^{3,*}, Puris A.V.⁴

^{1, 2, 3, 4} Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

* Corresponding author (tiv-mgn[at]mail.ru)

Abstract

The possibility of using ettringitic, ash-alkali binders for the preparation of road pavements was determined in the work. The possibility of using ash-alkali concrete on the basis of hydro-removal ash of TPP in the production of the main concrete bearing layer and ettringite binder for reinforcement of crushed stone bases of motorways has been shown. The composition of concrete on ettringite binder for strengthening of road bases is developed, as well as the composition on ash-alkali binder for road bases is designed. Their physical and mechanical properties have been determined, which meet the requirements for a similar mixture based on traditional binders (such as Portland cement). The efficiency of application of the developed binders in road pavement construction has been established.

Keywords: hydrotreatment CHP ash, hardening, soluble glass, strength, calcium hydrosilicates, ettringite, pavement concrete, alkali binder, hydration, larnite.

Введение

Развитие инфраструктуры Российской Федерации состоит из нескольких направлений, одним из которых является повсеместное строительство и благоустройство сети автомобильных дорог. Автодорожное строительство является нерентабельным из-за высокой стоимости. Поэтому для снижения себестоимости необходимо использовать «местные» материалы и повышать качество дорог. Одним из способов повышения качества дорог является укрепление щебеночных и песчаных оснований вяжущими, в качестве которых используют битум, низкомарочные вяжущие.

В работе предлагается использовать золощелочное вяжущее для укрепления оснований дорог, и для создания бетона под асфальтобетонное покрытие. Использование золощелочного вяжущего позволит снизить экологическую напряженность промышленных регионов с тепловыми электростанциями.

Методы и принципы исследования

В ходе эксплуатации автомобильных дорог из автотранспорта выделяются выхлопные газы в состав которых входят: диоксид серы (SO₂), азот (N₂), водяной пар (H₂O), диоксид углерода (CO₂), угарный газ (CO), которые растворяясь в воде вызывают коррозию цемента. Глуховским В.Д. было установлено, что шлакощелочные вяжущие практически не подвержены коррозии портландцемента. Выхлопные газы растворяются в воде или оседая на снег совместно с антигололедными реагентами образуют различные кислоты и кислые соли, вызывающие коррозию цементного камня второго типа переходящую в коррозию третьего типа. В дальнейшем в результате снижения pH бетона разрушаются высокоосновные гидросиликаты кальция, которые составляют основу цементного камня и увеличивается доля высокоосновного гидросульфаталюмината кальция, который выкристаллизовывается в порах цементного камня вызывая давление порядка 80 МПа [2]. Химическая коррозия цементного камня способствует ускорению физического разрушения бетона за счет снижения морозостойкости, тем самым снижается срок службы

дорожных бетонных конструкций, что приводит к замене их. Частая замена конструкций отражается на себестоимости эксплуатации дорожного бетона.

Целью работы является получение золощелочного вяжущего для дорожного бетона соответствующего требованиям.

В качестве материалов использовали золу Магнитогорской ТЭЦ. Химический и минералогический составы выбранного материала приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Химический состав золы гидроудаления ТЭЦ г. Магнитогорск

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.82.1>

a ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	e ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂
0,84 – 0,9	9,0 – 9,88	7,2 – 8,1	20,10 – 20,18	0,57	0,29	27,8	22,65	2,93	0,413	0,52	0,8

Таблица 2 - Минералогический состав золы гидроудаления ТЭЦ г. Магнитогорск

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.82.2>

Элемент	Формула	%
Gehlenite	Al _{0.729} Ca _{0.968} O _{5.265} Si _{0.488}	14,8
Larnite	Ca ₂ O ₄ Si	53,1
Siderite	CFeO ₃	10,3
Quartz	O ₂ Si	12,6
Brownmillerite	Al _{0.114} Ca ₂ Fe _{1.886} O ₅	9,2

Из таблицы 2 видно, что химической активностью в щелочной среде обладают Larnite, Quartz, находящийся в аморфном состоянии [2]. Для этого золу измельчали в лабораторной вибромельнице до удельной поверхности 460 м²/кг. В качестве активизаторов твердения в работе были использованы гидроксид натрия плотностью 1,2 кг/л и промышленное натриевое растворимое стекло плотностью 1,43 кг/л.

Влияние вида активизатора на кинетику набора прочности золощелочного вяжущего определялась с помощью стандартных образцов, твердеющих в нормальных условиях (T = 20±5 °C, W = 100 %). Определение кинетики набора прочности проводилось в возрасте 3, 7, 14, 21 и 28 сут. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Влияние вида активизатора на прочностные характеристики золощелочного вяжущего

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.82.3>

Вид активизатора	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при изгибе, МПа
NaOH	0,6	0,1
Натриевое жидкое стекло	29,63	1,85
Al ₂ (SO ₄) ₃ ×10H ₂ O – 2%	2,35	0,84
Al ₂ (SO ₄) ₃ ×10H ₂ O – 4%	3,85	1,02
Al ₂ (SO ₄) ₃ ×10H ₂ O – 6%	6,31	2,06
Al ₂ (SO ₄) ₃ ×10H ₂ O – 8%	10,11	3,21
Al ₂ (SO ₄) ₃ ×10H ₂ O – 10%	9,13	3,24

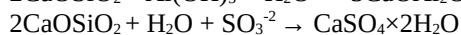
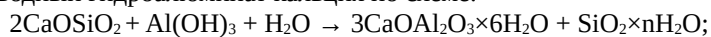
Из таблицы 3 видно, что оптимальное содержание сульфата алюминия 8% от массы золы.

Набор прочности при активизации растворимым натриевым стеклом обусловлено тем, что жидкое стекло в водном растворе разлагается на NaOH и Si(OH)₄. Кремневая кислота, адсорбируясь на поверхности Larnite, извлекает из его кристаллической решетки кальций и реагирует с ним, образуя низкоосновные гидросиликаты кальция. При этом одновременно повышается дефектность Larnite, что также способствует повышению его гидравлической активности. Химическое взаимодействие дефектного Larnite с водой образует гидросиликаты кальция и гидроксид кальция. Образованный Ca(OH)₂, реагируя с кремневой кислотой до ее полного устранения, также образует гидросиликаты кальция.

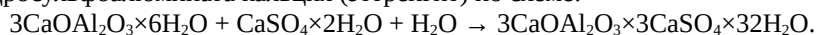
При активизации водным раствором сульфата алюминия происходит следующее:

- водный раствор сульфата алюминия имеет кислую среду, в зависимости от концентрации сульфата алюминия (рН от 6 до 3,5). В кислой среде происходит химическое взаимодействие основного ларнита с ионами алюминия и ионами

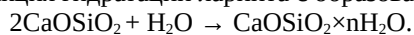
серной кислоты, в результате которой из кристаллической решетки ларнита извлекается оксид кальция и образуется 6-ти водный гидроалюминат кальция по схеме:



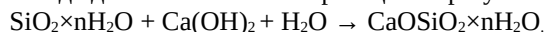
- шести водный гидроалюминат кальция реагирует с гипсом и образует высокоосновную форму гидросульфалюмината кальция (эттрингит) по схеме:



В результате вышеперечисленных реакций происходит частичное разрушение и деформация кристаллической решетки ларнита, в результате чего он становится химически активным к воде. В связи с этим происходит химическая реакция гидратации ларнита с образованием небольшого количества низкоосновных гидросиликатов по схеме:



В ходе данной химической реакции образуется одна молекула гидроксида кальция по схеме:



На основании выше изложенного получены вяжущие на растворимом стекле со следующими характеристикам:

Сроки схватывания:

- начало – 0,33 ч;

- конец – 0,58 ч;

- нормальная густота – 27,5.

Предел прочности при сжатии при твердении:

- нормальные условия – 29,63 МПа.

На сульфате алюминия

Сроки схватывания:

- начало – 0,22 ч;

- конец – 2,21 ч.

Вяжущее обладает ложным схватыванием, которое ликвидируется за счет дополнительного перемешивания,

- нормальная густота – 25,7.

Предел прочности при сжатии при твердении:

- нормальные условия – 10,11 МПа.

Основные результаты

На основе вышеуказанных вяжущих разработаны составы тяжелого бетона:

на золощелочном вяжущем для несущего слоя дорог бетон марки по удобоукладываемости П-1 (ок. – 1-4 см) (состав бетона класса В15: растворимое стекло – 210 л; золощелочное вяжущее – 290 кг; песок – 800 кг; щебень – 1000 кг);

на эттрингитовом вяжущем разработан укрепляющий состав мелкозернистого бетона для укрепления щебеночного основания дорог марки по удобоукладываемости П-5 (ок. 21 см и более) (состав бетона В3,5: 10%-й раствор сульфата алюминия – 240 л; эттрингитовое вяжущее – 265 кг; песок – 1635 кг).

Экономический эффект от применения золощелочного вяжущего в тяжелых бетонах можно произвести на примере мелкозернистых бетонов в сравнении с мелкозернистыми бетонами на ШПЦ. Он будет обеспечиваться разницей в стоимости этих бетонов, которая обеспечивается разницей в стоимости вяжущего. Экономический эффект замены в бетонах традиционного цемента ШПЦ 300 на золощелочное вяжущие составил: 75,17 руб. при аналогичных эксплуатационных свойствах.

Заключение

В результате проведенных исследований установлена возможность получения золощелочного и эттрингитового вяжущих на основе золы ТЭЦ гидроудаления (активностью 29,63 МПа и 10,11 МПа соответственно).

На данных вяжущих разработаны составы бетонов для несущего и укрепляющего основания бетонов прочностью (В15 и В7,5 соответственно). Экономический эффект при использовании золощелочного вяжущего 75,17 руб./м³, на основе эттрингитового вяжущего экономический эффект не рассчитывался.

Использование золы ТЭЦ гидроудаления позволяет получить не только экономический эффект, но и социальный, который заключается в снижении уровня загрязнения окружающей среды, а именно водной и воздушной.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Вишторский Е.М., Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А.Тимирязева, Москва, Российская Федерация

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.82.4>

Review

Vishtorsky E.M., Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.82.4>

Список литературы / References

1. Артамонова А.В Шлакощелочное вяжущее и бетоны на основе электросталеплавильных шлаков центробежно-ударного измельчения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Артамонова Анастасия Вячеславовна. — Магнитогорск, 2016. — 173 с.

2. Бутт Ю.М. Практикум по химической технологии вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. — М.: Высшая школа, 1973. — 504 с.
3. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества / А.В. Волженский, Ю.С. Буров, В.С. Колокольников. — М.: Издательство литературы по строительству, 1966. — 407 с.
4. Воронин К.М. Стабилизация структуры и свойств мартеновского шлака для повышения эффективности его использования в строительстве: дис. ... канд. техн. наук / Воронин К.М. — Магнитогорск: 1997. — 130 с.
5. Воронин К.М. Этtringитовое вяжущее для укрепления оснований дорог / К.М. Воронин, Д.Д. Хамидулина, С.А. Некрасова // Строительные материалы. — 2022. — № 12. — С. 22-25.
6. Вяткин М.Ф. О влиянии выхлопных газов автомобилей на здоровье человека / М.Ф. Вяткин, М.В. Куимова // Молодой ученый. — 2015. — №10. — С. 87-88.
7. Горшков В.С. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений: учебник для вузов / В.С. Горшков, В.Г. Савельев, Н.Ф. Федоров. — М.: Высшая школа, 1988. — 400 с.
8. Глуховский В.Д. Шлакощелочные цементы и бетоны / В.Д. Глуховский, В.А. Пахомов. — Киев, 1978. — 184 с.
9. Рояк С.М. Специальные цементы / С.М. Рояк, Г.С. Рояк. — М.: Стройиздат, 1983. — 279 с.
10. Худовекова Е.А. Получение неавтоклавного пенобетона на основе шлакощелочного вяжущего / Е.А. Худовекова, А.В. Артамонова, К.М. Воронин // Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: сборник материалов международной научно-практической конференции в трех томах. — 2014. — С. 77-80.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Artamonova A.V Shlakoshhelochnoe vjzhashhee i betony na osnove jelektrostaleplavil'nyh shlakov centrotbezhdnarnogo izmel'chenija [Slag-alkali binder and concrete on the basis of electric steelmaking slags of centrifugal-impact grinding]: dis. ... PhD in Technical Sciences: 05.23.05 / Artamonova Anastasija Vjacheslavovna. — Magnitogorsk, 2016. — 173 p. [in Russian]
2. Butt Ju.M. Praktikum po himicheskoj tehnologii vjzhashhhih materialov [Workshop on chemical technology of binding materials] / Ju.M. Butt, M.M. Sychev, V.V. Timashev. — M.: Higher School, 1973. — 504 p. [in Russian]
3. Volzhenskij A.V. Mineral'nye vjzhashhhie veshhestva [Mineral binding agents] / A.V. Volzhenskij, Ju.S. Burov, V.S. Kolokol'nikov. — M.: Publishing house of literature on construction, 1966. — 407 p. [in Russian]
4. Voronin K.M. Stabilizacija struktury i svojstv martenovskogo shlaka dlja povyshenija jeffektivnosti ego ispol'zovanija v stroitel'stve [Stabilization of structure and properties of open-hearth slag to improve the efficiency of its use in construction]: dis. ... PhD in Technical Sciences / Voronin K.M. — Magnitogorsk: 1997. — 130 p. [in Russian]
5. Voronin K.M. Jetringtonitovoe vjzhashhee dlja ukreplenija osnovanij dorog [Ettringite binder for strengthening road bases] / K.M. Voronin, D.D. Hamidulina, S.A. Nekrasova // Stroitel'nye materialy [Construction Materials]. — 2022. — № 12. — P. 22-25. [in Russian]
6. Vjatkin M.F. O vlijanii vyhlopnih gazov avtomobilej na zdorov'e cheloveka [On the influence of car exhaust gases on human health] / M.F. Vjatkin, M.V. Kuimova // Molodoy uchenyj [Young Scientist]. — 2015. — №10. — P. 87-88. [in Russian]
7. Gorshkov V.S. Fizicheskaja himija silikatov i drugih tugoplavkih soedinenij: uchebnyj dlja vuzov [Physical chemistry of silicates and other refractory compounds: textbook for universities] / V.S. Gorshkov, V.G. Savel'ev, N.F. Fedorov. — M.: Higher School, 1988. — 400 p. [in Russian]
8. Gluhovskij V.D. Shlakoshhelochnye cementy i betony [Alkali cements and concretes] / V.D. Gluhovskij, V.A. Pahomov. — Kyiv 1978. — 184 p. [in Russian]
9. Rojak S.M. Special'nye cementy [Special cements] / S.M. Rojak, G.S. Rojak. — M.: Strojizdat, 1983. — 279 p. [in Russian]
10. Hudovekova E.A. Poluchenie neavtoklavnogo penobetona na osnove shlakoshhelochnogo vjzhashhhego [Production of non-autoclaved foam concrete on the basis of slag-alkali binder] / E.A. Hudovekova, A.V. Artamonova, K.M. Voronin // Aktual'nye problemy stroitel'stva, jekologii i jenergoberezenija v uslovijah Zapadnoj Sibiri: sbornik materialov mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii v treh tomah [Current problems of construction, ecology and energy saving in Western Siberia: collection of materials of the International Scientific and Practical Conference in three volumes]. — 2014. — P. 77-80. [in Russian]