

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ВИБРОПРЕССОВАННЫХ И ВИБРОУПЛОТНЕННЫХ БЕТОНОВ НА КОМПОЗИЦИОННОМ КАРБОНАТНОШЛАКОВОМ ВЯЖУЩЕМ

Калашников В.И., Махамбетова К.Н., Петухов А.В.

ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» 440028, г. Пенза, улица Германа Титова, 28, e-mail: knmakhambetova@gmail.com

Одним из перспективных направлений для будущего строительства являются минеральношлаковые вяжущие, состоящие из 40-60 % шлака и 60-40 % измельченных горных пород, геошлаковые, содержащие 10-20 % шлака и 80-90 % горных пород и геосинтетические (геополимерные вяжущие) из горных пород с активизаторами твердения и модифицирующими добавками. Рассмотрена оценка активности Новотроицкого и Магнитогорского шлаков, карбонатношлаковых вяжущих и бетонов на их основе, активизируемых щелочью NaOH и содоизвестковой смесью. Результаты анализа кинетики формирования прочности карбонатношлаковых вяжущих показывают, что более активным в смешанном вяжущем является Магнитогорский шлак. Карбонатношлаковое вяжущее на нем более быстро твердеет по сравнению с карбонатношлаковым вяжущим на Новотроицком шлаке, при использовании как щелочного, так и содоизвестковой смеси. Представлены результаты исследования кинетики твердения и физико-технические свойства вибропрессованных и виброуплотненных щебеночных бетонов на композиционном, карбонатношлаковом вяжущем. Установлено, что прочностные показатели зависят не только от количества активизатора, но и от содержания вяжущего и заполнителей в бетоне. Использование содо-известкового активизатора позволяет получить вибропрессованные и виброуплотненные бетоны марок от 250 до 450, что существенно расширяет возможности применения карбонатношлаковых вяжущих и бетонов на их основе в России.

Ключевые слова: прочность, вибропрессованные бетоны, виброуплотненные бетоны, композиционное вяжущее, карбонатношлаковое вяжущее, молотый шлак, щелочь, содоизвестковая смесь, водовязущее отношение, водотвердое отношение.

THE RESEARCH OF STRENGTH PROPERTIES OF VIBROPRESSED AND VIBROCOMPACTED CONCRETES, BASED ON COMPOSITIONAL CARBONATE-SLAG BINDERS

Kalashnikov V. I., Makhambetova K.N., Petuchov A. V.

Penza State University of the Architecture and Construction, 440028, Penza, German Titov street, 28, e-mail: knmakhambetova@gmail.com

One of the perspective directions for future construction are mineral-slag binders consisting of 40-60 % slag and 60-40 % crushed rocks, geo-slag binders consisting of 10-20 % slag and 80-90% of rocks and geosynthetic (geopolymeric) binders from rocks with hardening activators and modifying additives. The article describes the evaluation of activity Novotroitsk and Magnitogorsk iron slag, carbonate-slag binders and concretes based on them, activated alkali NaOH and mixture of soda and lime. The results of the analysis of the kinetics of formation strength carbonate-slag binders show that Magnitogorsk iron slag is more active in mixed binder. Carbonate-slag binder at the Magnitogorsk iron slag more quickly hardens compared to carbonate-slag binder on the Novotroitsk iron slag by using both alkaline and codesvirtual mixture. This work presents the results of a research of the kinetics of hardening and physical-technical properties of vibrocompressed and vibrocompacted crushed concretes on compositional carbonate slag binders. It is established that the strength characteristics depend not only on the amount of activator, but also on the binder content and aggregate in concrete. Using the control soda-lime activator allows you to get vibropressed and vibocompacted concretes stamps from 250 to 450, which significantly extends the application possibilities of carbonate-slag binders and concretes based on them in Russia.

Keywords: strength, vibropressed concretes, vibrocompacted concretes, compositional binder, carbonate-slag binder, ground slag, alkali, soda-lime mixture, water-binder ratio, water-solid ratio.

Создание минеральношлаковых композиционных вяжущих на основе использования дисперсных горных пород осадочного и вулканического происхождения: известняка,

доломита, глины, молотого гравия, кремнеземистых и глауконитовых песчаников, базальта, диабазы, гранита, дацита, сиенита, диорита, способных отвердевать в смеси со шлаком и 2-3 % щелочи, извести и соды, щелочных растворимых солей в пресованном состоянии с формированием в нормальных условиях достаточной прочности принадлежит кафедре технологии бетонов, керамики и вяжущих (ныне кафедра технологии строительных материалов и деревообработки) Пензенского государственного университета архитектуры и строительства (ПГУАС). Преимущество таких материалов состоит в том, что они являются малощелочными, в отличие от шлакощелочных вяжущих и бетонов на их основе. Кафедра технологии бетонов, керамики и вяжущих опираясь на работы В.Д. Глуховского и его школы, других ученых-исследователей по шлакощелочным вяжущим является родоначальником глиношлаковых, карбонатношлаковых, гравелитошлаковых, дацитошлаковых, силицитошлаковых, геотшлаковых, геосинтетических вяжущих и композиционных материалов на их основе. За годы исследований сотрудниками кафедры опубликованы более 300 работ, начиная с 1993 года [1,2,3,4,5,6,7,9].

Новыми материалами, разработанными на кафедре технологии бетонов, керамики и вяжущих за последние годы, стали геотшлаковые и геосинтетические вяжущие [1,2,3,4,5,6,7,9], в которых доля шлака в композиционном вяжущем была снижена с 50-60 % до 10-20 %, а доля минеральных порошков с различным химико-минералогическим составом доведена до 80-90 %. Содержание щелочных активизаторов было снижено до 2 % NaOH, а растворимых солей, образующих NaOH за счет каустификации до 3-5 %. Геотшлаковые и геосинтетические (геополимерные) вяжущие [1,2,3,4,5,6,7,9], активизируются термохимическим методом. Это некоторые горные породы, формирующие высокую прочность с добавкой щелочи NaOH или соды, а также каустифицируемые в теле композита солями регенерирующими щелочь NaOH и KOH.

При изготовлении стеновых камней на основе карбонатношлаковых вяжущих методом силового пресования или вибропресования, возможно использовать, как показано ранее [8], щелочной активизатор NaOH или смешанный активизатор – соду Na_2CO_3 и гидратную известь. Однако, в зависимости от вида используемого молотого гранулированного шлака, прочностная эффективность этих видов активизаторов может быть различной. Считается, что щелочь при высокой молярности раствора, более эффективна в качестве активизатора твердения шлаков. Нами установлено, что щелочь может отверждать некоторые молотые горные породы за счет синтеза цементирующих новообразований. Такие вяжущие названы нами геосинтетическими [1,2,3,4,5,6,7,9]. Сода в индивидуальном виде не в состоянии отверждать горные породы. Не отверждаются содой и некоторые очень кислые шлаки, практически не содержащие в химическом составе CaO. Комбинация соды и извести

в оптимальном соотношении является эффективным активизатором твердения шлаков, минерально- и геошлаковых композиций, и даже отдельных горных пород, т.е. геосинтетических вяжущих.

Как известно, реакция каустификации соды известью протекает по следующей реакции: $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Ca}(\text{OH})_2 = 2\text{NaOH} + \text{CaCO}_3$

При этом 1% соды выделяет 0,75% щелочи. Эта реакция в растворе протекает достаточно быстро, но в жидкой фазе шлаковых и геошлаковых вяжущих замедляется. Скорость ее зависит от водотвердого отношения в бетонной смеси. Выделяющаяся щелочь активизирует твердение шлака, а побочный молекулярно-дисперсный кальцит является балластом и пополняет карбонат кальция, вводимый с карбонатношлаковым вяжущим. Он понижает прочность горных пород и шлаковых вяжущих по сравнению с прочностью их при использовании щелочи, особенно, в первые сроки твердения. В карбонатношлаковых вяжущих (КШВ) негативное действие нетвердеющего CaCO_3 снижается. Это объясняется тем, что образующийся кальцит синтактически нарастает на родственные ему частицы карбонатного наполнителя. С другой стороны, кальцит является «рекордсменом» по количеству габитусов кристаллов (несколько тысяч) и на него эпитаксиально нарастают инородные продукты гидратации шлака.

Задача исследований заключалась в оценке активности шлаков, карбонатношлаковых вяжущих (КШВ) и бетонов на их основе, активизируемых щелочью NaOH и содо-известковой смесью. Для оценки активности щелочных активизаторов использовали молотый Магнитогорский ($S_{\text{уд}}=390\text{м}^2/\text{кг}$) и Новотроицкий ($S_{\text{уд}}=510\text{м}^2/\text{кг}$) шлаки, в смесях с известняковой мукой Ивантеевского карьера, Саратовской области. Новотроицкий шлак содержал примеси металла и имел повышенную плотность. Его, возможно, было использовать для защиты от радиационных излучений при введении тяжелого песка и щебня. Удельная поверхность известняковой муки составляла $560\text{м}^2/\text{кг}$. Известняковую муку, шлак, соду и известь-пушонку однородно смешивали в шаровой мельнице с малым количеством шаров. В этом случае, полученную сухую смесь композиционного активизированного вяжущего можно хранить, транспортировать как готовое вяжущее, а при использовании для производства растворов и бетонов просто затворять водой. Соотношение между содой и известью варьировали, но во всех случаях принимали избыток извести по сравнению со стехиометрической реакцией для возможной известковой активизации шлака для образования гидросиликатов кальция. Карбонатношлаковое вяжущее (КШВ) состояло из 60% шлака и 40% известняковой муки. При использовании щелочного активизатора карбонатношлаковое вяжущее затворяли раствором щелочи, исходя из 2%-ого содержания NaOH на сухое вещество вяжущего, а при использовании содо-известкового активизатора –

водой. Водовязущее отношение составляло 0,12-0,17. Образцы-цилиндры диаметром и высотой 25 мм прессовали при давлении 25 МПа. Они твердели в одинаковых условиях, над водой при температуре 18-22°C. Результаты кинетики формирования прочности карбонатношлакового вяжущего (КШВ) представлены в табл. 1.

Таблица 1

Кинетика формирования прочности карбонатношлакового вяжущего

№ п/п	Наименование состава	В/Т	Плотность кг/м ³	Прочность при сжатии, R _{сж.} , МПа, через суток				
				3	7	28	80	420
1	Шлак Новотроицкий+2% NaOH на сухое вещество	0,12	2707	33,7	34,3	37,0	65,3	91,8
2	КШВ на Новотроицком шлаке с 2,8% соды и 3,7% извести в составе смеси	0,14	2435	13,9	16,5	28,0	32,4	100,8
3	Шлак Магнитогорский +2% NaOH на сухое вещество	0,17	2047	22,0	33,0	41,5	54,8	113,5
4	КШВ на Магнитогорском шлаке с 2,8% соды и 3,7% извести в составе смеси	0,14	2102	21,2	43,1	46,5	60,0	114,3

Как следует из табл. 1, Новотроицкий шлак, затворенный водой с 2% щелочи NaOH, обладает высокой скоростью набора прочности при сжатии, достигающей на 28 сутки твердения 37 МПа. Через 420 суток прочность при сжатии его превышает 28-суточную в 2,5 раза. Высокая плотность образцов объясняется наличием тонкодисперсного металла. Прочность через 28 суток КШВ на Новотроицком шлаке с содо-известковым активизатором снижается в 1,3 раза, по сравнению с Новотроицким шлаком, затворенным водой с 2 % щелочи NaOH, как и кинетика набора ее в начальный период твердения. Однако, в более поздний период твердения прочностные показатели его превышают прочности шлака со щелочью. Это, очевидно, связано с наличием извести на образование гидросиликатов кальция.

Более активным в смешанном вяжущем является Магнитогорский шлак. Карбонатношлаковое вяжущее на нем более интенсивно твердеет по сравнению с КШВ на Новотроицком шлаке, при использовании как щелочного, так и содо-известкового активизатора. На 28 сутки прочность при сжатии КШВ на Магнитогорском шлаке с содо-известковым активизатором в 1,7 раза выше, чем у КШВ на Новотроицком шлаке. Через 420 суток прочность при сжатии Магнитогорского шлака с 2 % щелочи NaOH (состав 3) увеличивается в 2,8 раза, а КШВ на Магнитогорском шлаке с содо-известковым активизатором (состав 4) – в 2,5 раза, по сравнению с 28-ми суточной. Это - важный фактор проявления конструктивных процессов, протекающих при длительном твердении минеральношлаковых вяжущих. В этом проявляется существенное преимущество таких вяжущих по сравнению с цементом. Цементный камень набирает высокую 28-суточную прочность во влажных условиях (до 80-100 МПа), однако годовой прирост прочности не превышает 30-50%.

Прессованные вяжущие из молотых гранулированных шлаков не поддаются жидкостекольной активации при малых дозировках жидкого стекла (2-3 %). Так, Нижнетагильский гранулированный шлак даже при высокой удельной поверхности ($680\text{ м}^2/\text{кг}$) при $V/T=0,25$ схватывается и не твердеет с значительной добавкой товарного жидкого стекла (8-17 %) в течении 7-10 суток, но через 28 суток имеет прочность 40-50 МПа. В свою очередь активизация этого шлака с содоизвестковым активизатором (сода – 6%, известь – 9%) способствовала формированию прочности при сжатии на 1 сутки до 18 МПа, а через 28 суток она достигла 62 МПа. Поэтому были изготовлены бетоны состава 1:2:2 и 1:2:1,5 (КШВ в смесях с известняковой мукой:песок:щебень) на Нижнетагильском шлаке с различным содержанием содо-известкового активизатора. Вибропрессование образцов-кубов с гранью 50 мм осуществлялось при прессующем давлении 0,09 МПа. Составы бетонов и кинетика нарастания прочности представлена в табл. 2.

Таблица 2

Кинетика твердения вибропрессованных щебеночных бетонов на композиционном, карбонатношлаковом вяжущем и их физико-технические свойства

№	Наименование состава	Количество по массе, кг	В/В	Плотность $\text{кг}/\text{м}^3$	Прочность при сжатии, $R_{сж}$, МПа, через суток				
					1	3	7	28	150
1	В:П:Щ:В=1:2:2:0,37 КШВ с 5,2% соды и 7,8% извести Песок Сурский с $M_{кр}=1,5$ Щебень известняковый фр.5-10мм Вода Влажность смеси – 7,4%	430 860 860 159	0,37	2252	4,6	9,2	14,6	23,0	33,2
2	В:П:Щ:В=1:2:1,5:0,34 КШВ с 5,2% соды и 7,8% извести Песок Сурский с $M_{кр}=1,5$ Щебень известняковый фр.5-10мм Вода Влажность смеси – 7,4%	486 972 729 165	0,34	2322	11,0	30,8	-	57,5	-
3	В:П:Щ:В=1:2:1,5:0,34 КШВ с 2,6% соды и 3,9% извести Песок Сурский с $M_{кр}=1,5$ Щебень известняковый фр.5-10мм Вода Влажность смеси – 7,4 %	486 972 729 165	0,34	2243	3,0	9,4	-	26,8	-
4	В:П:Щ:В=1:2:1,5:0,34 КШВ с 4,0% соды и 6,0% извести Песок Сурский с $M_{кр}=1,5$ Щебень известняковый фр.5-10мм Вода Влажность смеси – 7,4%	486 972 729 165	0,34	2300	6,2	14,7	-	31,1	42,4

Использование минеральношлаковых вяжущих в вибропрессованных бетонах для производства стеновых пустотных блоков, тротуарной брусчатки, поребрика и других мелкоштучных изделий может быть экономически оправдано по сравнению с цементными изделиями.

Как следует из табл. 2, прочностные показатели зависят не только от количества активизатора, но и от содержания вяжущего и заполнителей в бетоне. При уменьшении содержания щебня с 860 до 729 кг плотность при одинаковом расходе воды возрастает на 70 кг/м³, а прочность увеличивается более чем в 2 раза и достигает 57 МПа. С уменьшением содержания соды до 2,6% и извести до 3,9% прочность вновь падает в 2 раза. При средних расходах соды – 4% и извести – 6% (состав 4) прочностные показатели повышаются лишь на 14%, по сравнению с составом 3. Поэтому в зависимости от требуемой марки бетона необходимо корректировать содержание компонентов в смеси. Так, при изготовлении стеновых пустотных блоков с прочностью 15-20 МПа можно добавлять малые расходы соды и извести. Для тротуарной плитки и других мелкоштучных изделий наиболее приемлем состав 2, с маркой бетона М400-М450. Морозостойкость такого бетона превышает 200 циклов. Использование карбонатношлаковых вяжущих (КШВ) также возможно при изготовлении изделий из вибрационно-уплотняемых бетонов при применении тех шлаков, которые плохо активизируются силикатами натрия в малообводненных составах.

В табл. 3 приведены состав бетонной смеси с использованием КШВ на Нижнетагильском шлаке жесткостью Ж-1 с добавкой ЛСТ в количестве 0,3% от массы вяжущего с водовязущим отношением В/В=0,47.

Таблица 3

Кинетика твердения виброуплотненных щебеночных бетонов на композиционном, карбонатношлаковом вяжущем

№ п/п	Наименование состава	Количество по массе, кг	В/В	Плотность кг/м ³	Прочность при сжатии, R _{сж} , МПа, через суток			
					1	3	7	28
1	В:П:Щ:В=1:2:1,5:0,45 КШВ с 5,2% соды и 7,8 % извести Песок Сурский с Мкр=1,5 Щебень известняковый фр.5-10мм Вода+ЛСТ (0,3% от массы вяжущего) Влажность смеси – 10%	400 950 800 190	0,47	2255	3,6	6,0	-	32,0

Как следует из табл. 3, использование содо-известкового активизатора позволяет получить бетоны марок 250 по вибрационной технологии уплотнения, что существенно расширяет возможности применения минерально-шлаковых вяжущих, с учетом распространения в России зарубежных линий вибропрессования. Однако прочность в начальные сроки твердения формируется медленно и требует термической активации.

Установлено, что при тепловой обработке образцов существенно интенсифицируются процессы твердения с повышением прочности после пропаривания. Это связано с известными представлениями о высокой активности шлаков и зол-уноса при водотепловой

обработке. Таким образом, при использовании содо-известковой активации достигают следующие преимущества:

1. Возможно изготавливать сухие строительные смеси композиционного вяжущего на специализированном предприятии и отправлять их на заводы стройиндустрии.

2. Для получения каменной муки можно использовать дешевые отсеvy камнедробления, которых накопились в России более 6 млрд. тонн на предприятиях нерудной промышленности.

3. Возможно использовать каменную муку для асфальтобетонных смесей, а также карбонатную муку для подщелачивания почв, но с более высокой дисперсностью, равной 300-400 м²/кг и более.

4. Для изготовления минеральношлакового вяжущего возможно использовать молотые смеси гранулированных и отвальных шлаков в равном соотношении без потери качества.

Список литературы

1. Ерошкина Н.А. Минерально-щелочные вяжущие [Текст]: монография / Н.А. Ерошкина, В.И. Калашников, М. О. Коровкин. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2012. – 151 с.
2. Калашников В.И. Методология получения геосинтетических и геотехнических композиционных строительных материалов на основе осадочных силикатных горных пород [Текст]: монография / В.И. Калашников, Ю.В. Грачева, К.Н. Махамбетова. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2011. – 120 с.
3. Калашников В.И. Минеральношлаковые вяжущие на основе осадочных силикатных пород [Текст]: монография / В.И. Калашников, А.А. Карташов, В.Л. Хвастунов, Р.Н. Москвин, Ю.С. Кузнецов, В.С. Демьянова, В.Я. Кудашов. – Пенза: Изд-во ЦНТИ, 2006. – 135 с.
4. Калашников В.И. Каустифицированные композиционные минеральношлаковые вяжущие и строительные материалы на их основе [Текст]: монография / В.И. Калашников, Р.Н. Москвин, М.Н. Мороз, В.Л. Хвастунов, А.А. Карташов, Ю.С. Кузнецов, В.С. Демьянова, В.Я. Кудашов, И.М. Крышов. – Пенза: Изд-во ЦНТИ, 2006. – 176 с.
5. Калашников В.И. Глиношлаковые строительные материалы [Текст]: монография / В.Ю. Нестеров, В.Л. Хвастунов, П.Г. Комохов, В.И. Соломатов, В.Я. Марусенцев, В.М. Тростянский. – Пенза, 2000. – 206 с.
6. Калашников В.И. Карбонатношлаковые композиционные строительные материалы [Текст]: монография / В.Л. Хвастунов, О.Л. Викторова, В.С. Демьянова, Ю.С. Кузнецов, Н.И.

Макридин, А.В. Гречишкин, Д.В. Калашников, М.О. Коровкин, М.Н. Мороз, В.А. Тяпкин. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2006. – 168 с.

7. Калашников В.И. Эффективные жаростойкие материалы на основе модифицированного глиношлакового вяжущего [Текст]: монография / В.Л. Хвастунов, Р.В. Тарасов, П.Г. Комохов, А.В. Стасевич, В.Я. Кудашов. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2004. – 118 с.

8. Калашников В.И. Безобжиговые малощелочные минеральношлаковые вяжущие и бетоны на их основе. [Текст]: В.Л. Хвастунов, А.В. Хвастунов // «Технологии бетонов». – 2007. - №1. – С. 8-10.

9. Хвастунов В.Л. Минерально-шлаковые вяжущие и бетоны на их основе [Текст]: научно-промышленная энциклопедия. «Бетон» / В.И. Калашников. – СПб.: Изд-во «Профессионал», 2009. – С. 118-150.

Рецензенты:

Ерофеев В.Т., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технологии», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», г. Саранск;

Макридин Н.И., д.т.н. профессор кафедры технологии строительных материалов и деревообработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», г. Пенза.