

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

УДК 691.3:669.431.6

В. И. БОЛЬШАКОВ¹, М. А. ЕЛИСЕЕВА^{2*}, С. А. ЩЕРБАК³

¹Каф. «Материаловедение и обработка металлов», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (056) 745 23 72, эл. почта bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

^{2*}Каф. «Реконструкция и управление в строительстве», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (096) 377 01 36, эл. почта SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

³Каф. «Технология строительных материалов, изделий и конструкций», Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24 а, Днепропетровск, Украина, 49600, тел. +38 (095) 243 32 09, эл. почта aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

КОНТАКТНАЯ ПРОЧНОСТЬ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ ИЗ ДОМЕННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ШЛАКОВ

Цель. Исследование предполагает упрочнение контактной зоны мелкозернистого бетона за счет механической обработки всех компонентов бетонной смеси в смесителе-активаторе и применение заполнителя с шероховатой поверхностью. **Методика.** Для достижения поставленной цели в качестве смесителя-активатора был использован активатор роторного типа РС-06, разработанный научно-исследовательским институтом строительного производства. В виде мелкого заполнителя применялся доменный гранулированный шлак, имеющий более развитую шероховатую поверхность, чем песок. Данная установка обеспечивает интенсивное гомогенное перемешивание компонентов бетонной смеси, обогащение сырьевых материалов (очистение их частичек от загрязняющих веществ), а также механическую деструкцию поверхностных слоев доменного гранулированного шлака и других входящих в смесь компонентов. **Результаты.** При подготовке работы проводились экспериментальные исследования с определением состава новообразований мелкозернистых бетонов при помощи дифференциально-термического и рентгенофазового методов анализа, а также физико-механических свойств мелкозернистых бетонов в соответствии с действующими стандартами Украины. Установлено, что фазовый состав новообразований мелкозернистых бетонов, приготовленных из активированных и неактивированных смесей, не изменяется. Их главное различие состоит в величине создаваемых эффектов и температурных интервалов возникновения этих пиков. Так, у мелкозернистых бетонов, изготовленных на основе активированных смесей, величина эффектов меньше, что свидетельствует о более высокой степени гидратации его компонентов. Кроме того, на кривых ТГ на дериватограммах образцов бетона потеря массы гелеобразных гидросиликатов кальция бетона из механоактивированной смеси на 0,5...0,7 % выше, чем в бетоне из неактивированной смеси, что свидетельствует о большем количестве этих новообразований в бетонах из активированных смесей. В целом, бетоны различного состава, изготовленные на основе смеси, обработанной в смесителе-активаторе, имеют более высокую механическую прочность. **Научная новизна.** Получили дальнейшее развитие представления о влиянии механической активации компонентов мелкозернистых бетонных смесей формовочной влажности в смесителе-активаторе роторного типа на значение контактной прочности цементного камня и заполнителя. **Практическая значимость.** Упрочнение контактной зоны мелкозернистого бетона при проведении совместной обработки всех компонентов бетонной смеси в смесителе-активаторе достигается благодаря повышению степени гидратации сырье-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

вых компонентов бетона; созданию условий для протекания твердофазных химических реакций между его компонентами; улучшению структуры полученного материала. Это способствует существенному увеличению механической прочности механоактивированных мелкозернистых бетонов приблизительно в 5 раз в сравнении с бетонами, изготовленными из неактивированных смесей, что дает возможность снизить расход цемента при изготовлении 1 м³ бетона до 59 %.

Ключевые слова: контактная прочность; мелкозернистые бетонные смеси; доменные гранулированные шлаки; механоактивация; смеситель-активатор роторного типа; степень гидратации; состав новообразованного бетона; механическая прочность бетона

Введение

Наиболее слабым элементом в бетоне, подверженном разрушению при действии внешних нагрузок является контактная зона, т. е. участок контакта цементного камня и заполнителя. Происходит это из-за существенного различия их физико-механических свойств (модуля деформации, коэффициента Пуассона, коэффициента линейного термического расширения) и размеров контактирующих фаз, а также наличия микродефектов на поверхности раздела фаз [1, 19]. Для исключения данной проблемы некоторые ученые предлагают применять в качестве заполнителей материалы, схожие по своим физико-химическим и механическим свойствам с цементом. Например, доменные гранулированные шлаки. Вопросы исследования свойств и возможности использования вторичных материальных ресурсов в производстве бетонов посвящено ряд работ как украинских ученых [8, 10, 13–16], так и зарубежных [5, 17, 20–24]. Достоинством доменных гранулированных шлаков является их сходный с цементом химический состав, высокая химическая активность, высокоразвитая шероховатая поверхность его зерен. К главным недостаткам следует отнести высокую пустотность, что при его использовании в бетонах ведет к повышенному расходу вяжущего или получению бетонов с неудовлетворительными прочностными показателями. Ученые по-разному решают эту проблему. Так, в работе [14] авторы предлагают использовать рациональный зерновой состав компонентов бетона, который, по их мнению, достигается при соотношении расхода крупной фракции к средней и к мелкой 52:23:25, а их размеров примерно 100:10:1. Для того, чтобы обеспечить такой зерновой состав компонентов бетона исследователи в качестве тонкодисперсной фракции к цементу вводили золу-уноса Приднепровской ТЭС, а в качестве легкого заполнителя использовали доменный гранулированный шлак металлургического за-

вода им. Петровского. Подбор состава производился путем рассева вышеперечисленных материалов. Немецкий ученый Andreas Ehrenberg [21] предлагал оптимизацию гранулометрического состава доменных гранулированных шлаков путем их измельчения и просеивания в различных специальных установках. В основу этой работы положено сочетание в растворах сверхтонкой фракции доменного гранулированного шлака с удельной поверхностью > 10 000 см²/г, крупного песка доменного гранулированного шлака с удельной поверхностью < 2 000 см²/г и портландцементного клинкера средней дисперсности. Ученому удалось получить материал, имеющий высокую раннюю прочность и улучшенные технологические свойства формируемой смеси. При этом, он указывает на недостаточную распространенность своей разработки из-за высоких энергетических затрат при получении сверхтонкого шлака.

В последнее время для улучшения свойств готовых строительных материалов из вторичных материальных ресурсов широко используют различные химические добавки. Так, в работе [24] исследователь предложил в бетоны вводить новую органо-минеральную добавку, состоящую из молотого доменного гранулированного шлака и суспензии микрокремнезема в водном растворе щелочного активатора шлака. При этом, следует отметить, чем больше компонентов в бетонной смеси используется, тем больше будут дополнительные затраты, связанные с оборудованием емкостей для их хранения, приемных бункеров, дозаторов, транспортными расходами на их привоз и пр. К тому же недостаточно изучен вопрос влияния химических добавок в строительных материалах на организм людей.

Мы предлагаем, проводить механоактивацию компонентов бетона в смесителе-активаторе роторного типа. Это позволяет не только оптимизировать гранулометрический состав доменного гранулированного шлака и улучшить ряд других

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

свойств у обрабатываемых материалов, но и повысить прочность сцепления материалов между собой, в данном случае цементного камня и доменного гранулированного шлака.

Цель

Упрочнение контактной зоны мелкозернистого бетона за счет механической обработки всех компонентов бетонной смеси в смесителе-активаторе и применения заполнителя с шероховатой поверхности.

Методика

Для достижения поставленной цели в качестве смесителя-активатора был использован активатор роторного типа РС-06, разработанный научно-исследовательским институтом строительного производства; в виде мелкого заполнителя применялся доменный гранулированный шлак, имеющий более развитую шероховатую поверхность, чем песок. Данная установка обеспечивает интенсивное гомогенное перемешивание компонентов бетонной смеси, обогащение сырьевых материалов (очищение их частичек от загрязняющих веществ), а также механическую деструкцию поверхностных слоев доменного гранулированного шлака и других входящих в смесь компонентов.

Результаты

Еще в 50-х годах опыты, проведенные советским ученым Ю. М. Лещинским, подтвердили факт целесообразности применения гранулированных доменных шлаков вместо песка при изготовлении бетонов. Исследователь заменил 50 % мелкого песка на шлак и получил механическую прочность бетона на 60 % выше [19]. Полученный эффект исследователь объяснил тем, что между цементным камнем и доменным гранулированным шлаком имеется высокое химическое взаимодействие и высокая степень их механического зацепления из-за высокоразвитого микрорельефа поверхности шлака.

Как было установлено ранее [5, 19], доменный гранулированный шлак в составе портландцементного бетона выполняет функцию активного микрозаполнителя. Его поверхностный слой реагирует с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе цемента. При этом образуется дополнительное количество

гидросиликатов кальция, обеспечивающих создание чрезвычайно прочной связи заполнителя с цементной матрицей. Это значительно улучшает адгезионную прочность бетона, его коррозионную стойкость и ряд других физико-механических характеристик.

Кроме того, известно [5, 8], что при обычной комнатной температуре доменные гранулированные шлаки практически не проявляют химической активности при взаимодействии с водой и очень медленно твердеют. Лишь при воздействии механических, химических или тепловых факторов их реакционная способность повышается и они начинают активно взаимодействовать с водой и цементом, быстро твердеть и образовывать монолитный камень. Связано это с тем, что в их минералогическом составе практически отсутствуют активные фазы. Более интенсивно, чем кристаллические фазы, взаимодействуют с водой шлаковые стекла. Их химическая активность зависит от температуры получаемого из печи шлакового расплава, его химического состава, характера и скорости грануляции. При быстром охлаждении шлаковых расплавов шлаковые стекла приобретают очень высокую потенциальную реакционную способность, а шлаки – способность реагировать с портландцементом при добавлении воды [8, 12].

В настоящее время наиболее применяемым способом повышения химической активности доменных гранулированных шлаков как в Украине [10, 16, 18], так и за рубежом остается химический, а именно их щелочная активизация [17, 22, 23]. При введении щелочных добавок, таких как NaOH или Na₂CO₃, добавляемых в количестве до 7 % от массовой части шлаков, нарушается термодинамически неустойчивое равновесие шлакового стекла. Это способствует его перестройке и образованию гидросиликатов, гидроалюмосиликатов, щелочных гидроалюмосиликатов, что и приводит к ускорению твердения и упрочнению искусственного шлакового камня [8, 12].

Метод механической активации доменных гранулированных шлаков менее распространен, чем химический, вследствие требуемых для его осуществления дополнительных затрат. Однако, он позволяет получить и более существенный эффект. Достоинством данного метода является то, что при нем происходит не только увеличение реакционной способности обраба-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

тываемых материалов, а комплексное улучшение ряда их физико-химических и механических свойств, что в конечном итоге положительно сказывается на качестве и эксплуатационных свойствах бетона, изготовленного из механоактивированного сырья.

Вопросы повышения реакционной способности доменных гранулированных шлаков, влияния высокоскоростной механоактивации на их свойства и механизм воздействия механической энергии на обрабатываемые материалы рассматривались нами в работах [2–4].

Совместная механическая активация заполнителя (доменного гранулированного шлака) и вяжущего (портландцемента) в присутствии воды позволяет увеличить значение контактной прочности бетона за счет более интенсивного протекания химических реакций между заполнителем и вяжущим, в результате чего на границе их контакта образуются гидросиликаты кальция. Это происходит вследствие того, что в результате механического воздействия на заполнитель его поверхностные слои аморфизуются, образуются трещины, которые заполняются цементным тестом. Вследствие высокой щелочности цемента растворимость аморфизированной поверхности шлака значительно повышается. Все это обеспечивает существенное увеличение сцепления цементного камня и заполнителя.

Мы предлагаем, проводить механоактивацию компонентов мелкозернистого бетона в смесителе-активаторе роторного типа РС-06, разработанного научно-исследовательским институтом строительного производства. Техническая характеристика и оптимальный режим работы данной установки при активации доменных гранулированных шлаков и приготовлении мелкозернистых бетонных смесей приведены в статье [2]. Он обеспечивает осуществление одновременно однородного перемешивания, обогащения (очищения частичек обрабатываемых материалов от загрязняющих веществ), механической активации и частичного домола компонентов бетонной смеси в присутствии необходимого количества воды. Приготовление смесей формочной влажности дает возможность повысить их качество и значительно упростить технологию приготовления.

В качестве количественных оценок, определяющих интенсивность химического взаимодейст-

вия цементного камня с заполнителем и упрочнение контактной зоны бетона, были приняты:

1) состав новообразований мелкозернистых бетонов, изготовленных из активированных и неактивированных смесей;

2) механическая прочность этих бетонов.

При реализации экспериментальных исследований применялись дифференциально-термический и рентгенофазовый методы анализа состава новообразований бетонов; методы определения прочности бетонов, согласно действующих стандартов Украины. Оценивание проводилось путем сравнения свойств мелкозернистых бетонов, изготовленных из бетонных смесей разного приготовления: в смесителе принудительного действия (неактивированные смеси) и в высокоскоростном смесителе-активаторе роторного типа (активированные смеси) при строго одинаковых их составах, степени удобоукладываемости, условий твердения и методов испытания.

В качестве сырьевых материалов при изготовлении мелкозернистой бетонной смеси использовались доменный гранулированный шлак производства ПАО «Евраз – Днепропетровский металлургический завод им. Петровского» с модулем крупности 3,2, насыпной плотностью – 780 кг/м³, пустотностью – 70 %, водопотребностью – 35,73 %; портландцемент с минеральными добавками марки ПЦ II / Б – Ш – 400 ДСТУ Б В.2.7-46:2010 производства Криворожского цементного завода ПАО «ХайдельбергЦемент Украина» с нормальной густотой 27 %, остатком на сите № 008 – 7,1 %, прочностью при сжатии – 40,8 МПа, прочностью при изгибе – 6,4 МПа; вода техническая.

В исследованиях состава новообразований в мелкозернистых бетонах в качестве проб использовались внутренние зоны образцов-кубов бетонов, которые измельчались в ступке до порошкообразного состояния. Результаты исследований представлены на рис. 1–4.

На всех дериватограммах мелкозернистых бетонов (рис. 1–2) наблюдаются процессы окисления, что свидетельствует о наличии пирротина, гетита и магнетита. Магнетит Fe₃O₄ имеет два экзотермических эффекта при температуре 350–400 °С, которому соответствует окисление магнетита до маггемита γ-Fe₂O₃, и при температуре 600–1 000 °С, при которой происходит переход маггемита в гематит α-Fe₂O₃ [7].

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Для гетита ($\alpha\text{-FeO}\cdot\text{OH}$) характерен эндотермический эффект в интервале температур от 300 до 400 °С, связанный с его дегидратацией. По данным В.С. Горшкова [7] температура этого эффекта зависит от размера частиц гетита. Крупные частицы в пробе материала сдвигают эндотермический эффект дегидратации в сторону более высоких температур, мелкие частицы, наоборот, в сторону низких температур. После эндотермического пика кривая ДТА находится немного выше основной линии, а в некоторых случаях сразу происходит кристаллизация остатка в гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, что сопровождается небольшим экзотермическим эффектом. При температуре 680 °С возникает эндотермический эффект, связанный с полиморфным превращением гематита $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в магнетит $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [6].

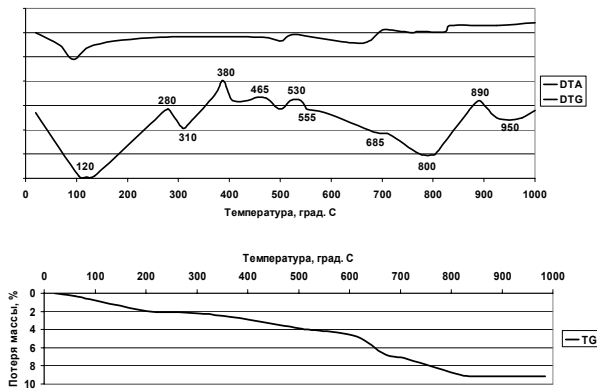


Рис. 1. Дериватограмма образца мелкозернистого бетона из неактивированной смеси состава 1:3

Fig. 1. Derivation of the sample of fine-grained concrete from inactive mixture composition 1:3

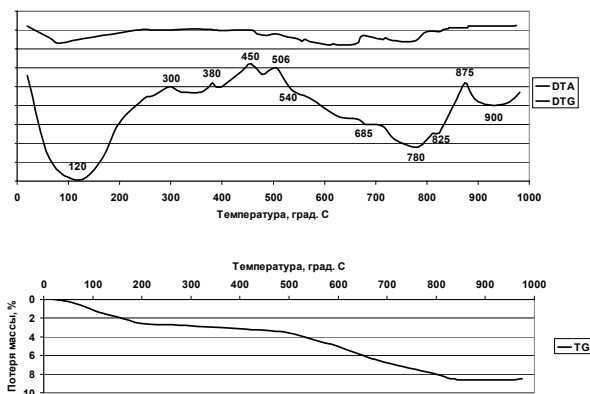


Рис. 2. Дериватограмма образца мелкозернистого бетона из активированной смеси состава 1:3

Fig. 2. Derivation of the sample of fine-grained concrete from active mixture composition 1:3

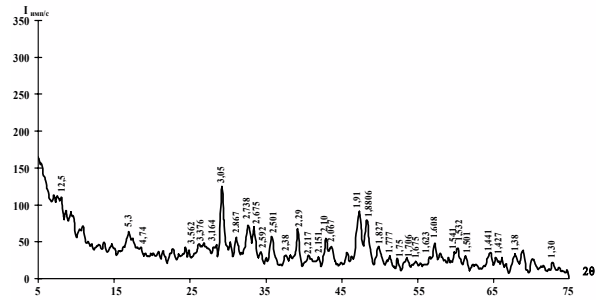


Рис. 3. Дифрактограмма образца мелкозернистого бетона из неактивированной смеси состава 1:3

Fig. 3. Diffractogram of the sample of fine-grained concrete from inactive mixture composition 1:3

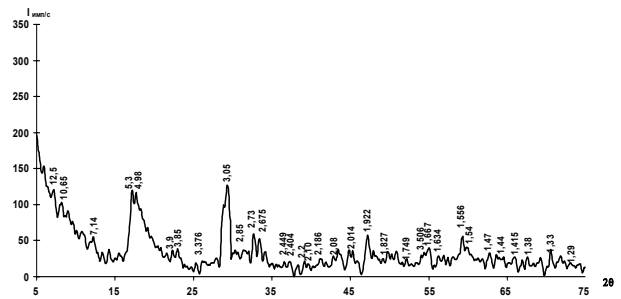


Рис. 4. Дифрактограмма образца мелкозернистого бетона из активированной смеси состава 1:3

Fig. 4. Diffractogram of the sample of fine-grained concrete from active mixture composition 1:3

На дифференциальных кривых всех образцов бетонов имеется эндотермический эффект при температуре 120 °С, свидетельствующий о дегидратации тоберморитового геля, близкого к аморфному, слабозакристаллизованному гидросиликату кальция тоберморитоподобной группы.

Также на дериватограммах наблюдается экзотермический эффект при 875–890 °С, соответствующий кристаллизации стекла или окислению магнетита кислородом воздуха. Ему предшествует эндотермический эффект при температуре 825–830 °С, который накладывается на другой эндотермический эффект при 775–800 °С. Первый пик связан, по-видимому, с затратами энергии на перегруппировку связей в стекловидной фазе перед ее кристаллизацией, так как при нем не наблюдается потеря массы материала. Второй эндотермический эффект (775–800 °С) может быть вызван полиморфным превращением шеннонита ($\gamma \rightarrow \alpha$) или разложением кальцита на CaO и CO_2 . На присутствие карбоната кальция (CaCO_3) указывает также широкий эндотермический эффект при температуре 935–950 °С.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

Экзоэффект при 250–300 °С указывает на наличие в бетоне гелеобразного (аморфного) окисла железа состава $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Он образуется в результате реакции между щелочью (цементом) и солями железа. На величину эффекта и его температурный диапазон влияет начальное значение рН среды. Чем больше показатели рН, тем выше значение температуры эндотермического пика [7].

Другие небольшие экзоэффекты указывают, по-видимому, на кристаллизацию стекол различного состава [6, 11, 19], эндоэффекты – на дегидратацию гидроалюминатов кальция.

Кроме того, следует обратить внимание на характер кривых ТГ мелкозернистых бетонов из активированных и неактивированных смесей. Так, образец мелкозернистого бетона из активированной смеси состава 1:3 в интервале температур 50–200 °С (рис. 2) теряет примерно 2,6 % массы, тогда как образец из неактивированной смеси того же состава (рис. 1) – 2 %. Поскольку в этом температурном диапазоне происходит дегидратация гелеобразных гидросиликатов кальция, то это свидетельствует о большем количестве этих новообразований в бетонах из активированных смесей.

Наличие перечисленных фаз подтверждается результатами рентгенофазового анализа. На рентгенограмме образца мелкозернистого бетона из неактивированной (рис. 3) и активированной смеси (рис. 4) идентифицируется наличие низкоосновных гидросиликатов кальция типа CSH(I) по дифракционным отражениям $d/n = 1,25; 0,53; 0,307; 0,24; 0,183; 0,167; 0,153$ нм; мелилита ($\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Si})\text{Si}_2\text{O}_7$) по $d/n = 0,2858; 0,2291; 0,1881; 0,1608; 0,1429; 0,1384$ нм; магнетита (Fe_3O_4) по $d/n = 0,2098; 0,171; 0,1612; 0,1479; 0,1277$ нм; гетита ($\alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH}$) по $d/n = 0,5; 0,336; 0,245; 0,20; 0,18; 0,1359; 0,1317; 0,1291$ нм; шеннонита ($\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) по $d/n = 0,202; 0,1908; 0,144; 0,1411; 0,1303$ нм; трехкальциевого силиката ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) по $d/n = 0,2957; 0,267; 0,2304; 0,1979; 0,1926; 0,1771; 0,1623; 0,1497; 0,1392$ нм. Перечисленные ниже дифракционные отражения могут принадлежать как шеннониту, так и трехкальциевому силикату ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$): $d/n = 0,2738; 0,2592; 0,2185; 0,1752; 0,1633; 0,1543; 0,1377$ нм.

С целью определения механической прочности приготавливались бетоны 3-х составов (1:3, 1:5 и 1:10) на основе активированных смесей одинакового водотвердого отношения ($\text{B/T} = 0,135$)

и неактивированных смесей с водотвердым отношением $\text{B/T} = 0,21$. В первом случае смеси перемешивались в смесителе-активаторе роторного типа в течение 45 с, во втором – в смесителе принудительного действия в течение – 3–4 мин. Образцы-кубы бетона испытывались на прочность при сжатии в ранние и поздние сроки твердения согласно ДСТУ Б В. 2.7-214:2009 [9]. Результаты сравнительных испытаний мелкозернистых бетонов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний мелкозернистых бетонов одинаковой жесткости и состава при разных способах приготовления бетонных смесей

Table 1

The result of comparative tests of fine-grained concrete with the same rigidity and composition at different modes of concrete mixes preparation

Состав бетона	Расход материалов на 1м ³ бетона, кг			Жесткость бетонной смеси, с	Прочность при сжатии образцов бетона в возрасте 28 суток, МПа
	цемент	шлак	вода		
Бетон, приготовленный в смесителе-активаторе РС-06					
1:3	466	1 398	252,6	5	33,8
1:5	307,4	1 537	249,9	7,2	9,68
1:10	166,1	1 661	247,5	13	7,59
Бетон, приготовленный в смесителе принудительного действия					
1:3	406	1 218	341	5	6,52
1:5	268,2	1 341	338,1	7,2	1,74

Нами также был изучен характер нарастания прочности во времени для мелкозернистых бетонов, изготовленных из активированных и неактивированных смесей различного состава (табл. 2).

Полученные результаты исследований свидетельствуют о том, что прочность бетонов, изготовленных из активированных смесей выше, чем прочность бетонов из неактивированных в среднем в 5,2 раза. Существенное повышение прочности бетона объясняется аморфизацией поверхностных слоев заполнителя, уве-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

личением реакционной способности вяжущего и заполнителя в результате возникновения кристаллоструктурных нарушений, образования свежих поверхностей с химически активными центрами и изменения энергетического состояния обрабатываемых материалов под воздействием механической энергии.

Таблица 2

Наращение прочности мелкозернистых бетонов во времени

Table 2

The increase in fine-grained concrete strength through time

Бетонная смесь	Прочность при сжатии, при продолжительности твердения, суток, МПа			
	3	7	14	28
Активированная:				
состав 1:3, Ж1 (5 с);	10,8	20,8	26,4	33,8
состав 1:5, Ж1 (7 с);	2,68	5,12	6,93	9,68
состав 1:10, Ж2 (13 с)	1,88	2,57	5,52	7,59
Неактивированная:				
состав 1:3, Ж1 (5 с);	1,2	3,6	5	6,52
состав 1:5, Ж1 (7 с)	–	0,63	0,87	1,74

Кроме того, проведение совместной активации заполнителя и вяжущего в присутствии воды способствует увеличению значения контактной прочности бетона за счет более интенсивного протекания химических реакций между заполнителем и вяжущим, в результате чего на границе их контакта образуются гидросиликаты кальция. Это происходит вследствие обеспечения цементом щелочности среды, которая повышает растворимость аморфизированной поверхности шлака.

Научная новизна и практическая значимость

Получили дальнейшее развитие представления о влиянии механической активации компо-

нентов мелкозернистых бетонных смесей формочной влажности в смесителе-активаторе роторного типа на контактную прочность цементного камня и заполнителя. Практическая значимость. Упрочнение контактной зоны мелкозернистого бетона при проведении совместной обработки всех компонентов бетонной смеси в смесителе-активаторе достигается благодаря повышению степени гидратации сырьевых компонентов бетона; созданию условий для протекания твердофазных химических реакций между его компонентами; усовершенствованию структуры полученного материала. Это способствует существенному увеличению механической прочности механоактивированных мелкозернистых бетонов приблизительно в 5 раз в сравнении с бетонами, изготовленными из неактивированных смесей, что дает возможность снизить расход цемента при изготовлении 1 м³ бетона до 59 %.

Выводы

Таким образом, проведение механической активации бетонной смеси в смесителе-активаторе роторного типа позволило повысить контактную прочность мелкозернистого бетона из доменных гранулированных шлаков, доказательством чего служит:

1. Повышение степени гидратации компонентов бетона в контактной зоне, а также увеличение содержания образовавшихся гидросиликатов кальция в его составе. Так, образец мелкозернистого бетона из активированной смеси состава 1:3 при дегидратации гелеобразных гидросиликатов кальция теряет примерно 2,6 % массы, тогда как образец из неактивированной смеси того же состава – 2 %. Это свидетельствует о большем количестве этих новообразований в бетонах из активированных смесей. В целом, фазовый состав образцов мелкозернистых бетонов, приготовленных различным образом, не изменяется. Их главное различие состоит в величине создаваемых эффектов и температурных интервалов возникновения этих пиков. Так, у мелкозернистых бетонов, изготовленных на основе активированных смесей величина эффектов меньше, что свидетельствует о более высокой степени гидратации его компонентов.

2. Увеличение механической прочности бетонов из активированных смесей примерно в 5,2 ра-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

за, по сравнению с бетонами из неактивированных смесей. Кроме того, бетоны на основе активированных смесей имеют меньшую водопотребность вследствие того, что у используемого шлака при активации снижаются показатели водопотребности и пустотности. Для получения равнопрочных бетонов из активированных смесей по сравнению с бетонами из неактивированных можно снизить расход цемента в 3,3 раза, используя 10 и менее % вяжущего от массы гранулированного шлака.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Баженов, Ю. М. Технология бетонов : учеб. для студ. высш. учебн. заведений / Ю. М. Баженов. – 3-е изд. – М. : АСВ, 2002. – 500 с.
2. Большаков, В. И. Влияние высокоскоростной обработки доменных гранулированных шлаков на их свойства / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, С. А. Щербак // Вісн. Придніпр. держ. акад. буд-ва та архіт. – 2013. – № 8. – С. 4–9.
3. Большаков, В. И. Повышение прочности мелкозернистого бетона путем механохимической активации его компонентов / В. И. Большаков, М. А. Елисеева, С. А. Щербак // Стр-во, материаловедение, машиностроение. Сер. : Создание высокотехнолог. социоэкокомплексов в Украине на основе концепции сбалансир. (устойчивого) развития : сб. науч. тр. – Д., 2011. – Вып. 60. – С. 26–31.
4. Большаков, В. И. Повышение реакционной способности доменного гранулированного шлака / В. И. Большаков, С. А. Щербак, М. А. Елисеева // Стр-во, материаловедение, машиностроение. Сер. : Стародубовские чтения : сб. науч. тр. – Д., 2011. – Вып. 59, том II. – С. 34–38.
5. Гилязидинова, Н. В. Коррозионная стойкость шлакобетонов / Н. В. Гилязидинова, Н. Ю. Рудковская, Т. Н. Санталова // Бетон и железобетон. – 2013. – № 3. – С. 24–25.
6. Горшков, В. С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ : учеб. пособие / В. С. Горшков, В. В. Тимашев, В. Г. Савельев. – М. : Высш. шк., 1981. – 335 с.
7. Горшков, В. С. Термография строительных материалов / В. С. Горшков. – М. : Изд-во лит. по стр-ву, 1968. – 237с.
8. Дворкин, Л. И. Строительные материалы из отходов промышленности : учеб.-справоч. пос. / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. – Ростов н/Д. : Феникс, 2007. – 368 с.
9. Державний стандарт України ДСТУ Б В. 2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. – На заміну ГОСТ 10180-90 ; надано чинності 2009-12-22. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 43 с.
10. Лужно-активовані лакопортландцементи / П. В. Кривенко, О. М. Петропавловський, О. Г. Гелевера та ін. // Вісн. Донбас. нац. акад. буд-ва та архіт. – 2009. – № 1. – С. 123–131.
11. Марченко, А. А. Металлургические шлаки и применение их в строительстве / А. А. Марченко. – М. : Госстройиздат, 1962. – 547 с.
12. Напрямки і перспективи використання відходів металургійної, гірничорудної та хімічної промисловості в будівництві / В. І. Большаков, Г. М. Бондаренко, А. І. Головка та ін. – 2-е вид., виправ. та доп. – Д. : Gaudeamus, 2000. – 140 с.
13. Нетеса, Н. И. Легкие бетоны на основе граншлака завода имени Петровского / Н. И. Нетеса, Д. В. Паланчук // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 35. – С. 156–161.
14. Нетеса, Н. И. Легкие бетоны с золой уноса Приднепровской ТЭС / Н. И. Нетеса, Д. В. Паланчук, А. Н. Нетеса // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. – 2013. – № 5. – С. 137–145.
15. Нетеса, Н. И. Снижение пустотности бетонных смесей подбором рационального зернового состава компонентов / Н. И. Нетеса // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2007. – Вип. 15. – С. 200–204.
16. Особливості процесів структуроутворення лужних шлакопортландцементів та бетонів на їх основі / К. К. Пушкарьова, О. А. Гончар, О. П. Бондаренко, І. С. Магдичанська // Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. пр. – К., 2009. – Вип. 17. – С. 54–61.
17. Пат. 69109688 Германия, МПК С 04 В 7/153. Verfahren zur Verbesserung der Aktivierung latent hydraulischer basischer Hochofenschlacke zur Herstellung eines Baumaterials / Kurz F., Lidingö SE (Германия) ; заявитель и патентообладатель Kurz F., Lidingö SE. – № 0553131 ; заявл. 04.08.93 ; опубл. 22.02.96, Бюл. № 7. – 12 с.
18. Пушкарьова, К. К. Особливості технології отримання лужного шлако-портландцементу та бетонів на його основі / К. К. Пушкарьова, О. А. Гончар, О. П. Бондаренко // Вісн. Донбас. нац. акад. буд-ва та архіт. – 2009. – № 1. – С. 82–88.
19. Федьнин, Н. И. Высокопрочный мелкозернистый шлакобетон / Н. И. Федьнин, М. И. Диамант. – М. : Стройиздат. – 1975. – 176 с.
20. Aggarwal, Y. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- as partial replacement of fine aggregates / Y. Aggarwal, R. Siddique // Construction and Building Materials. – 2014. – № 54. – P. 210–223. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051.
21. Ehrenberg, A. Hohe Frühfestigkeit bei Zementen mit Hüttensand – (k)ein Widerspruch? / A. Ehrenberg // Beton-Informationen. – 2005. – № 2. – P. 22–51.
 22. Garbach, A. Alkaliaktivierte Bindemittel auf der Grundlage von Eisenhüttenschlacken / A. Garbach, A. Ehrenberg // Report des FEhS-Instituts. – 2008. – № 1. – P. 7–10.
 23. Li, C. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and metakaolin (Si+Al) cements / Chao Li, Henghu Sun, Longtu Li // Cement and Concrete Research. – 2010. – Vol. 40. – P. 1341–1349. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.
 24. Živica, V. Effectiveness of new silica fume alkali activator / V. Živica // Cement and Concrete Composites. – 2006. – Vol. 28, № 1. – P. 21–25. doi: 10.1016/j.cemcomcomp.2005.07.004.

В. І. БОЛЬШАКОВ¹, М. О. ЄЛИСЕЄВА^{2*}, С. А. ЩЕРБАК³

¹ Каф. «Матеріалознавство та обробка матеріалів», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (056) 745 23 72, ел. пошта bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

^{2*} Каф. «Реконструкція та управління в будівництві», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (096) 377 01 36, ел. пошта SMU.TGO@uandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

³ Каф. «Технологія будівельних матеріалів, виробів та конструкцій», Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24 а, Дніпропетровськ, Україна, 49600, тел. +38 (095) 243 32 09, ел. пошта aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

КОНТАКТНА МІЦНІСТЬ МЕХАНОАКТИВОВАНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ БЕТОНІВ ІЗ ДОМЕННИХ ГРАНУЛЬОВАНИХ ШЛАКІВ

Мета. Дослідження передбачає зміцнення контактної зони дрібнозернистого бетону за рахунок механічної обробки всіх компонентів бетонної суміші в змішувачі-активаторі та застосування заповнювача із шорсткуватою поверхнею. **Методика.** Для досягнення поставленої мети в якості змішувача-активатора був використаний активатор роторного типу РС-06, розроблений науково-дослідним інститутом будівельного виробництва. У вигляді дрібного заповнювача застосовувався доменний гранульований шлак, який має більш розвинену шорсткувату поверхню, ніж пісок. Дана установка забезпечує інтенсивне гомогенне перемішування компонентів бетонної суміші, збагачування сировинних матеріалів (очищення їхніх часточок від забруднюючих речовин), а також механічну деструкцію поверхневих шарів доменного гранульованого шлаку та інших компонентів, що входять у суміш. **Результати.** При підготовці роботи проводилися експериментальні дослідження з визначенням складу новоутворень дрібнозернистих бетонів за допомогою диференційно-термічного та рентгено-фазового методів аналізу, а також фізико-механічних властивостей дрібнозернистих бетонів відповідно до діючих стандартів України. Встановлено, що фазовий склад новоутворень дрібнозернистих бетонів, виготовлених із активованих і неактивованих сумішей, не змінюється. Їх головна відмінність полягає у величині утворюваних ефектів і температурних інтервалів виникнення цих піків. Так, у дрібнозернистих бетонів, виготовлених на основі активованих сумішей, величина ефектів менше, що свідчить про більш високий ступінь гідратації його компонентів. Крім того, на кривих ТГ на дериватограмах зразків бетону втрата маси гелеподібних гідросилікатів кальцію бетону з механоактивованої суміші на 0,5...0,7 % вище, ніж у бетону з неактивованої суміші, що свідчить про більшу кількість цих новоутворень у бетонах з активованих сумішей. В цілому, бетони різного складу, виготовлені на основі суміші, обробленої в змішувачі-активаторі, мають більш високу механічну міцність. **Наукова новизна.** Одержали подальший розвиток уявлення про вплив механічної активації компонентів дрібнозернистих бетонних сумішей формувальної вологості в змішувачі-активаторі роторного типу на значення контактної міцності цементного каменю та заповнювача. **Практична значимість.** Зміцнення контактної зони дрібнозернистого бетону при проведенні сумісної обробки всіх компонентів бетонної суміші в змішувачі-активаторі досягається завдяки підвищенню ступеня гідратації сировинних компонентів бетону; створенню умов для протікання твердофазних хімічних реакцій між його компонентами; поліпшенню структури отриманого матеріалу. Це сприяє істотному збільшенню механічної міцності механоактивованих дрібнозернистих бетонів приблизно в 5 разів у порівнянні

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

з бетонами, виготовленими з неактивованих сумішей, що дає можливість знизити витрату цементу при виготовленні 1 м³ бетону до 59 %.

Ключові слова: контактна міцність; дрібнозернисті бетонні суміші; доменні гранульовані шлаки; механоактивація; змішувач-активатор роторного типу; ступінь гідратації; склад новоутворень бетону; механічна міцність бетону

V. I. BOLSHAKOV¹, M. O. YELISIEIEVA^{2*}, S. A. SHCHERBAK³

¹Dep. «Materials Science», State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St. 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. (056) 745-23-72, e-mail bolshakov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0790-6473

^{2*}Dep. «Reconstruction and Construction Management», State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (096) 377 01 36, e-mail SMU.TGO@yandex.ua, ORCID 0000-0003-4474-3255

³Dep. «Building Materials, Products and Structures Technology», State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Chernyshevskiy St., 24 a, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49600, tel. +38 (095) 243 32 09, e-mail aspirant@mail.pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0003-0346-4436

CONTACT STRENGTH OF MECHANOACTIVATED FINE CONCRETES FROM GRANULATED BLAST-FURNACE SLAGS

Purpose. Strengthening of fine concrete contact zone by mechanical processing of all components of the concrete mix in a mixer-activator and aggregate application with rough surface. **Methodology.** Rotary activator PC-06, developed by Scientific and Research Institute of Construction Technology, was used as a mixer-activator to achieve this purpose. Granulated blast furnace slag, having a more developed rough surface than sand, was used as fine aggregate. This apparatus provides intensive homogeneous mixing of concrete mix components, processing of raw materials (purification of their particles from contaminants), and mechanical destruction of granulated blast furnace slag surface layers and other components of the mix. **Findings.** During the preparation work, experimental research of new formations composition of fine concretes, using differential thermal and x-ray phase analysis methods, and physical-mechanical properties of fine concretes in accordance with the applicable standards of Ukraine, were carried out. It is established that the phase composition of new formations of fine concretes made from activated and non-activated mixes, is not changed. Their main difference is the size of generated effects and temperature intervals of occurrence of these peaks. Thus, in fine concretes made on the basis of the activated mixes, magnitude of effects is less, indicating a higher hydration degree of its components. Besides, TG curves of concrete specimens show that weight loss of gel calcium hydrosilicate of concrete from a mechanically activated mix is 0.5...0.7 % more than of concrete from a non-activated mix, which indicates a larger number of these formations in concrete from activated mixes. In general, concretes of different composition, made from a mix, processed in the mixer-activator, have higher mechanical strength. **Originality.** Ideas about the influence of mechanical activation of components of fine concrete mixes with forming humidity in a rotary mixer-activator on the value of the contact strength of cement and aggregates got further development. **Practical value.** Strengthening of contact area of fine concrete in the exercise of the combined machining of all concrete mix components in the mixer-activator is achieved owing to increment of hydration degree of raw concrete components; creation of conditions for solid-phase chemical reactions between its components; structure improvement of the received material. It promotes significant increase of mechanical strength of mechanoactivated fine concretes (around 5 times) in comparison with concretes, made from a non-activated mix, which makes it possible to decrease the cement consumption when manufacturing 1 m³ of concrete up to 59 %.

Keywords: contact strength; fine concrete mixes; granulated blast-furnace slag; mechanoactivation; rotary mixer-activator; hydration degree; new formation composition of concrete; mechanical strength of concrete

REFERENCES

1. Bazhenov Yu.M. *Tekhnologiya betonov* [Concretes technology]. Moscow, ASV Publ., 2002. 500 p.
2. Bolshakov V.I., Yeliseyeva M.A., Shcherbak S.A. Vliyaniye vysokoskorostnoy obrabotki domennykh granulirovannykh shlakov na ikh svoystva [Influence of high-speed processing of blast-furnace granulated slag on its properties]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury – Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2013, no. 8, pp. 4-9.
3. Bolshakov V.I., Yeliseyeva M.A., Shcherbak S.A. Povysheniye prochnosti melkozernistogo betona putem mekhanokhimicheskoy aktivatsii yego komponentov [Fortification of fine concrete by mechanochemical acti-

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

- vation of its components]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materilovedeniye, mashynostroyeniye. Seriya: Sozdaniye vysokotekhnologicheskikh sotsioekokompleksov v Ukraine na osnove kontseptsii sbalansirovannogo (ustoychivogo) razvitiya»* [Proc. «Construction, Material Science, Mechanical Engineering. Series: Creation a high-tech sociocomplexes in Ukraine on the basis of balance (sustainable) development concept»], 2011, issue 60, pp. 26-31.
4. Bolshakov V.I., Shcherbak S.A., Yeliseyeva M.A. Povyseniye reaktivnoy sposobnosti domennogo granulirovannogo shlaka [Increase of reactionary ability of blast-furnace granulated slag]. *Sbornik nauchnykh trudov «Stroitelstvo, materilovedeniye, mashynostroyeniye»* [Proc. «Construction, Material Science, Mechanical Engineering»], 2011, issue 59, vol. II, pp. 34-38.
 5. Gilyazindova N.V., Rudkovskaya N.Yu., Santalova T.N. Korroziionnaya stoykost shlakobetonov [Corrosion resistance of slag concretes]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 2013, no. 3, pp. 24-25.
 6. Gorshkov V.S., Timashev V.V., Savelyev V.G. *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv* [Methods of physical-chemical analysis of binding materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 335 p.
 7. Gorshkov V.S. *Termografiya stroitelnykh materialov* [Thermography of building materials]. Moscow, Izdatelstvo literatury po stroitelstvu Publ., 1968. 237 p.
 8. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. *Stroitelnyye materialy iz otkhodov promyshlennosti* [Building materials from industrial waste]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2007. 368 p.
 9. DSTU B V. 2.7-214:2009. *Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy*. [State Standard B V. 2.7-214:2009. Building materials. Concretes. Methods of strength evaluation on check specimens]. Kyiv, Minrehionbud Ukrainy Publ., 2010. 43 p.
 10. Kryvenko P.V., Petropavlovskiy O.M., Helevera O.H., Vozniuk H.V., Pushkar V.I., Hots V.I., Tymoshenko S.A. Luzhno-aktyvovani shlakoportlandtsementy [Alkali-activated slag portland cements]. *Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture], 2009, issue 1, pp. 123-131.
 11. Marchenko A.A. *Metallurgicheskiye shlaki i primeneniye ikh v stroitelstve* [Metallurgical slag and its application in construction]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1981. 335 p.
 12. Bolshakov V.I., Bondarenko H.M., Holovko A. I., Zilberman O.Yu., Kryvenko P.V., Neviedomskiy V.O., Nikiforov O.P., Shimon M.I., Shcherbak S.A. *Napriamky i perspektivy vykorystannia vidkhodiv metalurhiinoi, hirnychorudnoi ta khimichnoi promyslovosti v budivnytstvi* [Areas and perspectives of application of metallurgical, ore mining and chemical industry wastes in construction]. Dnipropetrovsk, Gaudeamus Publ., 2000. 140 p.
 13. Netesa N.I., Palanchuk D.V. Legkiyye betony na osnove granshlaka zavoda imeni Petrovskogo [Lightweight-concretes on the basis of granulated slag from the iron and steel plant named after Petrovskiy]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 33, pp. 156-161.
 14. Netesa N.I., Palanchuk D.V., Netesa A.N. Legkiyye betony s zoloy unosa Pridneprovskoy TES [Lightweight concretes with fly-ash of Prydniprovsk thermal power station]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2013, no. 5, pp. 137-145.
 15. Netesa N.I. Snizheniye pustotnosti betonnykh smesey podborom ratsionalnogo zernovogo sostava komponentov [Descent of voidage of concrete mixes by design of rational grain distribution of components]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazaryana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2007, issue 15, pp. 200-204.
 16. Pushkarova K.K., Honchar O.A., Bondarenko O.P., Mahdychanska I.S. Osoblyvosti protsesiv strukturotvorennya luzhnykh shlakoportlandtsementiv ta betoniv na yikh osnovi [Features of structure formation processes of alkali slag portland cements and concretes on their basis]. *Zbirnyk naukovykh prats «Resursoekonomni materialy, konstruktivni, budivni ta sporudy»* [Resource-saving materials, constructions, buildings and structures], 2009, issue 17, pp. 54-61.
 17. Kurz F., Lidingö SE. Verfahren zur Verbesserung der Aktivierung latent hydraulischer basischer Hochofenschlacke zur Herstellung eines Baumaterials. Patent DE, no. 0553131, 1996.
 18. Pushkarova K.K., Honchar O.A., Bondarenko O.P. Osoblyvosti tekhnologii otrymannya luzhnoho shlakoportlandtsementu ta betoniv na yikh osnovi [Technology features of alkali slag portland cement and concretes on its basis]. *Visnyk Donbaskoi natsionalnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture], 2009, issue 1, pp. 82-88.

ТРАНСПОРТНЕ БУДІВНИЦТВО

19. Fedynin N.I., Diamant M.I. *Vysokoprochnyy melkozernisty shlakobeton* [High-strength fine slag concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1975. 176 p.
20. Aggarwal Y., Siddique R. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 2014. no. 54, pp. 210-223. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.051.
21. Ehrenberg A. Hohe Frühfestigkeit bei Zementen mit Hüttensand – (k)ein Widerspruch? *Beton-Informationen*, 2005, no. 2, pp. 22-51.
22. Garbach A., Ehrenberg A. Alkaliaktivierte Bindemittel auf der Grundlage von Eisenhüttenschlacken. *Report des FehS-Instituts*, 2008, no. 1, pp. 7-10.
23. Li Chao, Sun Henghu, Li Longtu. A review: The comparison between alkali-activated slag (Si+Ca) and meta-kaolin (Si+Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 2010, vol. 40, pp. 1341-1349. doi: 10.1016/j.cemconres.2010.03.020.
24. Živica V. Effectiveness of new silica fume alkali activator. *Cement and Concrete Composites*, 2006, vol. 28, no. 1, pp. 21-25. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2005.07.004.

Статья рекомендована к публикации д.т.н.,проф. Н. В. Шпирько (Украина); д.т.н., проф. Н. И. Нетесой (Украина)

Поступила в редколлегию: 10.06.2014

Принята к печати: 28.07.2014