

СВОЙСТВА ДОМЕННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ШЛАКОВ, ВЛИЯЮЩИЕ
НА КАЧЕСТВО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

М. А. Елисеева, к. т. н.

Ключевые слова: доменные гранулированные шлаки, мелкие заполнители бетона, физико-механические свойства, химический состав, минералогический состав, микроструктура, гранулометрический состав, плотность, пустотность, водопотребность

Постановка проблемы. Основополагающие свойства мелкозернистых бетонов, влияющие на их долговечность и срок службы изготовленного из них изделия, такие как прочность, деформативность, химическая стойкость и другие, во многом зависят от характеристик применяемого заполнителя. С уменьшением модуля крупности заполнителя его влияние на свойства бетонной смеси и затвердевшего бетона возрастает.

При этом как в Украине, так и за рубежом обостряется проблема дефицита качественного природного мелкого заполнителя для бетонов. Вместе с тем, низкокачественный песок в составе мелкозернистых бетонов можно заменить вторичными материальными ресурсами – отходами промышленности. Эффективнее всего использовать отходы черной металлургии – доменные гранулированные шлаки. Как было установлено ранее [15], 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, создающих чрезвычайно прочную связь заполнителя с цементной матрицей. Это значительно улучшает адгезионную прочность бетона, его коррозионную стойкость и ряд других физико-механических характеристик. Использование шлака позволит снизить себестоимость мелкозернистого бетона, а также освободить земельные угодья от шлаковых отвалов и улучшить экологическую обстановку в стране.

Анализ публикаций. Изучению свойств металлургических шлаков, а также строительных материалов и изделий, изготовленных на их основе, посвящен ряд работ таких ученых как: В. И. Бабушкин, В. И. Большаков, П. П. Будников, Ю. М. Бутт, А. В. Волженский, В. Д. Глуховский, П. В. Кривенко, В. Ф. Крылов, В. В. Лапин, А. С. Миронов, И. А. Пашков, Г. В. Пухальский, С. М. Рояк, Р. Ф. Рунова, Н. И. Федьнин, С. В. Шестоперов, С. А. Щербак, М. П. Элинзон, В. Н. Юнг и многие другие.

Целью работы является рассмотрение основных свойств доменных гранулированных шлаков, влияющих на качество мелкозернистого бетона, для того чтобы выявить, какую обработку шлаков наиболее целесообразно проводить при производстве прочных бетонов.

Основная часть. Для получения качественного, высокопрочного и долговечного мелкозернистого бетона на основе доменных шлаков требуется разработка и применение таких технологических приемов, которые бы позволяли максимально использовать положительные особенности структуры и физико-механических свойств сырья из доменного шлака, обеспечивая при этом экономию вяжущего и снижение себестоимости готового изделия [15; 16].

Структура и физико-механические свойства гранулированных доменных шлаков существенно отличаются от заполнителей естественного происхождения. Это необходимо учитывать в технологии производства мелкозернистых бетонов, особенно при организации операций подготовки шлака. Рассмотрим наиболее важные свойства гранулированных доменных шлаков, применяемых в качестве сырья при изготовлении мелкозернистых бетонов: химический и минералогический составы, микроструктуру, плотность, гранулометрический состав, пустотность, форму и рельеф поверхности зерен, водопотребность.

Химический состав доменных шлаков зависит от состава руды, плавней, вида используемого топлива, марки производимого чугуна, условий охлаждения шлакового расплава. Известно, что главными структурообразующими окислами шлаков являются: оксид кальция (CaO), оксид алюминия (Al₂O₃), оксид кремния (SiO₂), оксид магния (MgO), оксид марганца (MnO) и закиси железа (FeO + Fe₂O₃). Превалируют в составе шлака CaO, SiO₂, Al₂O₃ и отчасти MgO, суммарная доля которых составляет 90 – 95 % [4; 8; 11; 16].

Диоксида кремния в шлаках значительно больше, нежели в составе портландцементного клинкера. Высококремнеземистые шлаки при охлаждении практически не кристаллизуются и застывают в виде стекла.

Высокое содержание закиси марганца в составе шлака является неблагоприятным, т. к. в этом случае происходит частичное замещение оксида кальция в активных минералах и образование менее активных минералов. По мнению П. П. Будникова, С. М. Рояка и др., при содержании MnO в шлаке более 3 – 4 % снижается его гидравлическая активность, ухудшаются свойства и структура шлакового стекла.

Немаловажную роль в шлаке играет содержание серы. Так, сульфид кальция CaS с содержанием от 2 – 3 мас. % до 5 мас. % повышает гидравлическую активность шлака, так как его большая часть при взаимодействии с водой образует гидроксид кальция (Ca(OH)₂), которая и активизирует шлаковое стекло. Высокое содержание таких сернистых соединений как FeS и MnS, наоборот, является неблагоприятным, поскольку снижает активность шлака и может вызвать железистый и марганцевистый распад. При взаимодействии с водой эти вещества образуют малоактивные гидроксиды железа и марганца, удельный объем которых больше объема исходных веществ реакции гидролиза, что и приводит к распаду шлаков [4].

Содержание отдельных оксидов в шлаке и их влияние на другие его свойства оцениваются при помощи следующих показателей: модуля основности, модуля активности и коэффициента качества [16; 17]. Модуль основности (M_o) выражается как соотношение суммы основных оксидов шлака (CaO и MgO) к сумме кислотных оксидов (SiO₂ и Al₂O₃), при этом шлаки относят к основным, если их $M_o > 1$, нейтральным, если $M_o = 1$ и кислым если $M_o < 1$. Модуль активности (M_a) определяется отношением количества глинозема в шлаке (Al₂O₃) к содержанию кремнезема (SiO₂).

Показатель коэффициента качества шлаков K ввел П. П. Будников и предложил с его помощью оценивать гидравлическую активность гранулированных шлаков, устанавливаемую по следующим формулам:

$$\text{при содержании MgO до } 10 \% \quad K = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2},$$

$$\text{при содержании MgO более } 10 \% \quad K = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 10}{\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + (\text{MgO} - 10)}.$$

Гидравлическая активность гранулированных доменных шлаков с увеличением всех этих показателей повышается.

Нами исследовался гранулированный доменный шлак производства ПАО «Евраз – Днепропетровский металлургический завод им. Петровского».

Согласно данным, предоставленным заводом-производителем, доменный гранулированный шлак имеет довольно постоянный химический состав, приведенный в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав доменных гранулированных шлаков

Содержание оксидов в среднем, % по массе				
SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂
37,90 – 38,21	48,90 – 50,10	4,36 – 4,87	7,56 – 7,83	0,47 – 0,58

Результаты химического анализа показывают, что основными компонентами доменных гранулированных шлаков завода им. Петровского являются оксид кальция (CaO) и кремнезем (SiO₂), которые в сумме составляют более 85 %. Он относится к высококремнеземистым, низкоглиноземистым (содержание Al₂O₃ находится в пределах 6 – 8,5 %) и маломagneзиальным (содержат до 8 % MgO) шлакам.

На основании данных таблицы 1 рассчитанные средние величины модуля основности, модуля активности и коэффициента качества используемого шлака составляют соответственно: $M_o = 1,17 - 1,19$; $M_a = 0,199 - 0,205$; $K_k = 1,59 - 1,62$. Таким образом, исследуемый доменный гранулированный шлак – основной ($M_o > 1$), относящийся ко 2-му сорту качества.

Оксиды, содержащиеся в доменном шлаке, образуют различные минералы. Согласно диаграммам состояния соответствующих систем оксидов шлака, он отличается многокомпонентностью фазового состава, так как в нем может содержаться до сорока двойных и тройных соединений, ведущими среди которых являются силикаты, алюмосиликаты, алюминаты и ферриты. Соединения, входящие в минералогический состав доменных гранулированных шлаков, во многом сходны с минералами портландцементного клинкера,

однако отличаются более низкой основностью и в большей степени состоят из аморфизированных, стеклоподобных веществ. Стекловидная фаза, по сравнению с кристаллической, обладает более разупорядоченной структурой [16].

Определение фазово-минералогического состава материалов проводилось методами рентгенографического и дифференциально-термического анализов. В обоих исследованиях был использован доменный гранулированный шлак после рассева.

Расшифровки рентгеновской дифрактограммы (рис. 1) и термограммы (рис. 2) доменных гранулированных шлаков выполнялись на основании работ известных советских ученых В. С. Горшкова, В. В. Тимашева, В. Г. Савельева [5; 6].

Критерием наличия фазы при РФА является совпадение не менее трех значений межплоскостных расстояний, соответствующих наиболее интенсивным линиям на дифрактограмме.

На рентгенограмме доменного гранулированного шлака (рис. 1) идентифицируется наличие шеннонита (γ - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) по дифракционным отражениям $d/n=$ 0,433; 0,405; 0,382; 0,274; 0,225; 0,202; 0,1908; 0,144; 0,1273 нм; ларнита (β - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) по $d/n=$ 0,324; 0,305; 0,2878; 0,2166; 0,1627; 0,1574 нм; мелилита ($\text{Ca}_2(\text{Al, Mg, Si})\text{Si}_2\text{O}_7$) по $d/n=$ 0,3468; 0,1939; 0,1881; 0,1828; 0,1734; 0,1513; 0,1434; 0,13845 нм; гетита (α - $\text{FeO}\cdot\text{OH}$) по $d/n=$ 0,247; 0,1769; 0,1685; 0,1563; 0,1473; 0,139; 0,1359; 0,1317; 0,1291 нм; пирротина (FeS) по $d/n=$ 0,293; 0,267; 0,215; 0,209; 0,164; 0,160; 0,144; 0,134 нм; гематита (α - Fe_2O_3) по $d/n=$ 0,365; 0,2203 и 0,1692 нм, а также следы др. минералов (мервинита, корунда, монтichelлита).

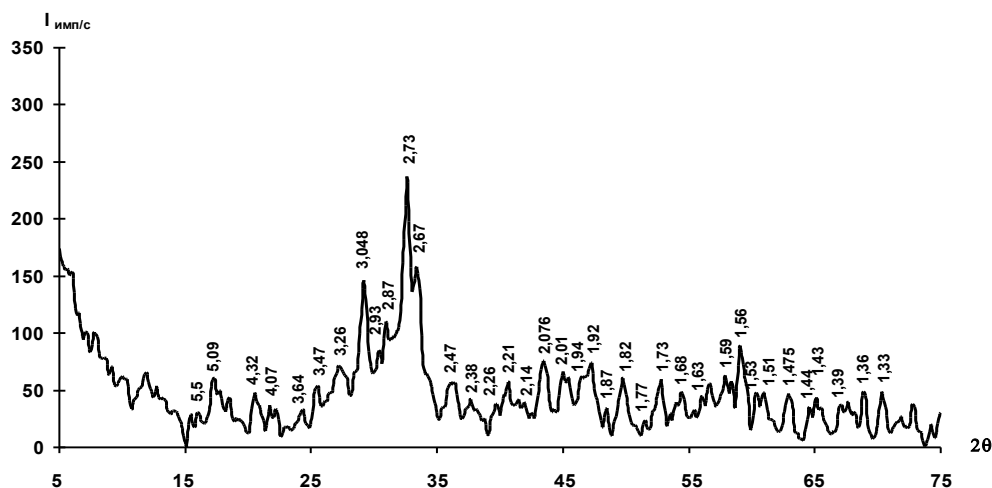
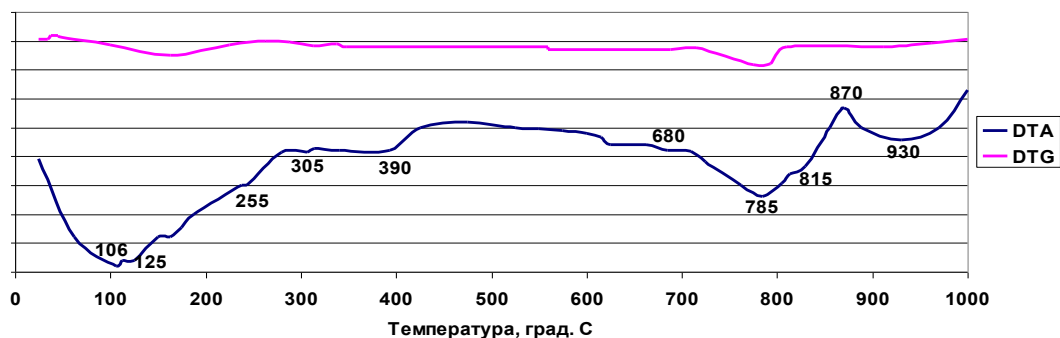


Рис. 1. Дифрактограмма доменного гранулированного шлака

Наличие данных фаз подтверждают результаты дифференциально-термического анализа (рис. 2). Так, на дериватограмме наблюдается экзотермический эффект при 870 °С, соответствующий кристаллизации стекла или окислению сульфидов железа кислородом воздуха. Ему предшествует эндотермический эффект (без потери массы) при температуре 815 °С, связанный с затратами энергии на перегруппировки связей в стекловидной фазе перед ее кристаллизацией. Эндоэффект при 785 °С может быть вызван полиморфным превращением шеннонита ($\gamma \rightarrow \alpha$). Широкий эндотермический эффект при температуре 930 °С соответствует началу расстекловывания стекла.



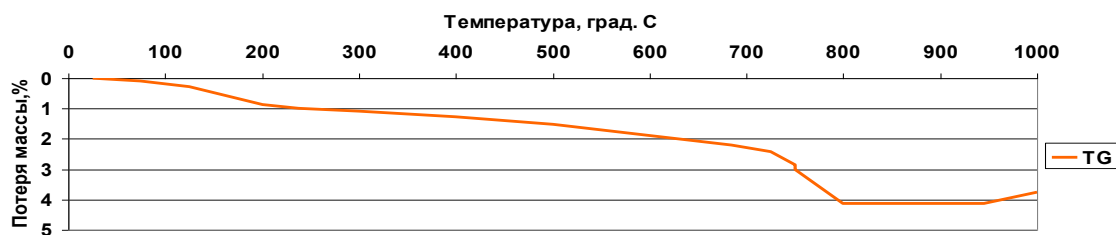


Рис. 2. Дериватограмма доменного гранулированного шлака

Для гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), по данным [5], характерен небольшой эндоэффект при 678 °С, вызванный его переходом в маггемит $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, что сопровождается резким изменением свойств.

Кристаллические моногидраты окиси железа имеют три модификации: α (гетит), β и γ (лепидокрокит). Дифференциальная кривая гетита ($\alpha\text{-FeO}\cdot\text{OH}$) имеет эндотермический эффект в интервале температур от 300 до 400°С, вызванный его дегидратацией с переходом в безводную кристаллическую форму $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (гематит). По данным В. С. Горшкова [6], температура этого эффекта зависит от размера частиц гетита. Крупные частицы в пробе материала сдвигают эндоэффект дегидратации в сторону более высоких температур, а мелкие частицы, наоборот, в сторону низких температур. После эндотермического пика происходит кристаллизация остатка в гематит, сопровождающаяся небольшим экзотермическим эффектом. Затем, по данным [5], на кривой ДТА появляется эндоэффект при температуре 680°С, связанный с полиморфным превращением $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ в $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Широкий эндотермический эффект при 106°С связан с удалением адсорбированной влаги на поверхности частицы шлака. Небольшие эндоэффекты при 125, 255 и 305°С вызваны, по-видимому, удалением гигроскопической влаги в моногидрате окиси железа β -модификации ($\beta\text{-FeO}\cdot\text{OH}$).

Таким образом, исследуемый шлак в большей мере содержит стеклоподобные минералы, а также кристаллические включения шеннонита, ларнита и железосодержащих оксидов и их гидратов. Высокому содержанию стеклофазы различного состава способствует повышенное количество в его химическом составе кремнезема, а также мокрый способ грануляции. Как известно [4], высококремнеземистые шлаки при охлаждении практически не кристаллизуются и застывают в виде стекла.

Микроструктура шлаков влияет на важнейшие свойства изготовляемого из них бетона – механическую прочность, химическую стойкость и долговечность.

Гранулы шлака, получаемые путем резкого охлаждения шлакового расплава, отличаются, помимо высокого содержания стеклофазы, еще и повышенной микро- и макропористостью, хрупкостью. Петрографические исследования, проведенные В. В. Лапиным [15] на прозрачных шлифах и аншлифах зерен шлаков различной плотности и способов охлаждения, показали, что структура всех проб шлаков характеризуется неравномерностью распределения пор и микротрещин разной ширины раскрытия и протяженности. Гранулированные шлаки быстрого охлаждения имеют более высокую микропористость и, вследствие этого, больше микротрещин, чем медленноохлажденные отвальные кусковые шлаки. Обусловлен данный факт резким охлаждением шлакового расплава при грануляции. Кроме того, пористость шлака имеет неоднородное значение по его массе. Так, пористость различных фракций быстроохлажденного шлака не совпадает и изменяется в интервале от 15 до 80 %. Одной из особенностей шлакового заполнителя является увеличение пористости зерен по мере увеличения их размера [15]. Высокая пористость доменных шлаков, прежде всего, вызвана их дегазацией при охлаждении шлакового расплава. Так как процесс газообразования не является регулируемым, влиять на степень пористости гранулированного шлака можно с помощью таких величин как вязкость шлаков, температура, а также скорость охлаждения шлакового расплава [18].

Микроскопические исследования доменных гранулированных шлаков проводились на микроскопе Neofhot 2 (рис. 3).

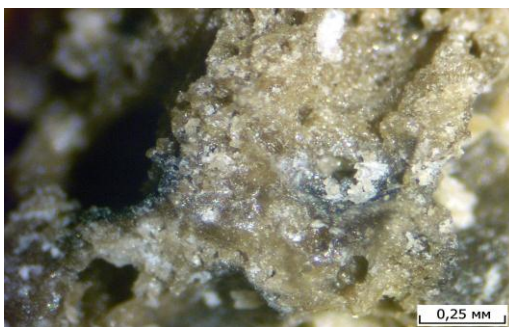


Рис. 3. Структура частицы доменного гранулированного шлака

Как показали результаты исследований (рис. 3), шлаковые зерна в значительной степени остеклованы и характеризуются пористой структурой. Частицы имеют буровато-желтый, буровато-зеленый окрас, а также от светло- до буровато-серого и черного. Такие цвета материала обусловлены высоким содержанием чистого бурого стекла и оксидов железа в стеклофазе, которые и придают шлаку темные тона. Часть из зерен шлака проявляют магнитные свойства, что также свидетельствует о наличии в его составе сульфидов и оксидов железа. Поры в шлаке имеют преимущественно неправильную продолговатую форму, некоторые сквозные щелевидные. Их размер колеблется в пределах от 0,0055 до 0,8 мм.

Доменный гранулированный шлак представляет собой крупнозернистый пористый песок с включениями зерен мелкого щебня. Наиболее важными физико-механическими свойствами доменного гранулированного шлака, используемого в качестве заполнителя мелкозернистого бетона, являются его гранулометрический (зерновой) состав и модуль крупности, насыпная плотность, пустотность и водопотребность. При этом зерновой состав – наиболее непостоянная его характеристика.

Ряд авторов [3; 7; 10; 12 – 15] рекомендуют для получения экономичных и прочных мелкозернистых бетонов применять заполнители с оптимальным гранулометрическим составом, имеющим достаточное количество крупных и мелких фракций. При этом каждый состав бетона имеет свой оптимальный гранулометрический состав заполнителя, при котором бетонная смесь характеризуется минимальным показателем водопотребности, а бетон – максимальным значением плотности и прочности. Так, по данным авторов работы [15], для тощих шлакобетонных смесей, при соотношении Ц : Ш = 1 : 6, оптимальное содержание в шлаке зерен мелкой фракции, размером менее 0,14 мм, составляет 20 – 30 %, а для жирных смесей, при соотношении Ц : Ш = 1 : 2 – 10 – 15 %. Объясняется данный факт тем, что в тощих смесях мелкие и пылевидные частицы шлака заменяют часть вяжущего и выполняют роль активного тонкодисперсного микрозаполнителя, улучшающего структуру и свойства бетона. В жирных же смесях наблюдается переизбыток мелких частиц в системе цемент – шлак мелкозернистого бетона, вызывающий деформации усадки и появление трещин при его высыхании, а также спад механической прочности бетона.

С помощью специальных технологических приемов (измельчение, фракционирование) можно в широких пределах изменять зерновой состав шлака.

Гранулометрический состав отобранных проб высушенного доменного гранулированного шлака определялся в лабораториях ДВНЗ ПГАСА в соответствии с ДСТУ Б В. 2.7-232:2010 [2]. Результаты исследований представлены в виде гистограмм на рисунке 4.

Как показали результаты исследований гранулометрического состава доменного гранулированного шлака (рис. 4), он характеризуется повышенным содержанием крупных фракций (5 – 2,5 мм) и пониженным содержанием мелких фракций (0,16 мм и менее). Так, в шлаке количество зерен размером от 5 мм и выше составляет 13 – 16 %, а количество зерен размером 0,16 мм и менее – 2,0 – 3,5 %. Данные значения показателей не удовлетворяют требованиям ДСТУ Б В. 2.7-232:2010, следовательно, исследуемые шлаки не могут рекомендоваться в качестве мелкого заполнителя для бетонов без их предварительной обработки [2].

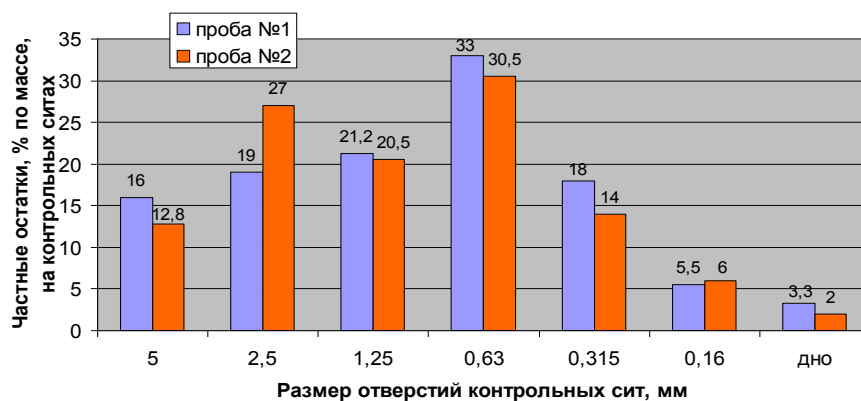


Рис. 4. Гранулометрический состав доменного гранулированного шлака

Важной характеристикой заполнителя является его пустотность, влияющая на расход вяжущего в бетоне, так как чем больше пустот, тем больше требуется вяжущего для их заполнения. Пустотность заполнителя напрямую зависит от его гранулометрического состава и формы зерен, поскольку определяется плотностью упаковки частиц заполнителя. Известно, что мелкий заполнитель характеризуется высокой пустотностью. Чтобы исключить данный недостаток, подбирают оптимальное соотношение мелких и крупных его фракций, т. к. при совмещении зерен разной крупности более мелкие частицы располагаются в пустотах между более крупными и, соответственно, пустотность заполнителя понижается [10; 13 – 14]. Наибольший эффект достигается при применении зерен двух фракций заполнителя: мелкой и крупной. При этом необходимо, чтобы соотношение крупной и мелкой фракции заполнителя составляло 7 : 3, и зерна мелкой фракции были в 7 – 10 раз меньше, чем зерна крупной фракции [1; 7]. Однако при прерывном гранулометрическом составе, где велика разница размеров зерен заполнителя, возникает опасность расслоения смеси, понижается ее удобоукладываемость. Поэтому на практике обычно используют заполнители с непрерывным гранулометрическим составом, имеющим большую пустотность, но исключая перечисленные недостатки. При повышенном содержании в заполнителе угловатых зерен плоской и удлиненной формы (игольчатых, лещадных) пустотность его увеличивается, а при повышенном содержании зерен окатанной формы – уменьшается. Пустотность шлака колеблется в пределах от 30 до 70 %.

Как показывают экспериментальные данные ряда исследователей [12; 14; 15], заполнители техногенного происхождения, в том числе и доменные шлаки, имеют преимущественно неправильную форму и шероховатую поверхность зерен. Ученые отмечают, что это вызывает увеличение пустотности такого заполнителя в сравнении с песком, а, следовательно, повышает расход вяжущего и водопотребность бетонной смеси, снижая при этом прочность бетона. Однако, вместе с этим, неправильная форма зерен гранулированных шлаков наряду с высокоразвитым шероховатым микрорельефом поверхности (до 80 % по объему) способствует значительному повышению прочности сцепления заполнителя с вяжущим. Поэтому следует подбирать оптимальное соотношение зерен различных форм для достижения максимальной прочности изготавливаемого бетона.

Плотность шлаков, по мере уменьшения их пористости и возрастания закристаллизованности структуры, увеличивается. Гранулированные доменные шлаки различных металлургических заводов, по данным [1; 15], имеют плотность в следующих пределах: истинная от 2,6 до 3 г/см³, насыпная от 600 до 1 300 кг/м³.

Для оценки влияния заполнителя на подвижность бетонной смеси используют такой показатель как водопотребность. Знание данной характеристики заполнителя помогает получить более точные технологические расчеты бетона, в частности, расчет его состава. Для получения наиболее достоверных значений водотребности заполнителей Б. Г. Скрамтаев и Ю. М. Баженов предложили исследовать данную характеристику заполнителя непосредственно в бетонной смеси или растворе. Водопотребность оценивают по количеству воды, необходимой для приготовления цементного теста и растворной смеси одинаковой консистенции.

Водопотребность гранулированного доменного шлака, ввиду его высокой пористости и пустотности, выше водопотребности природного песка и может достигать 30 %. Исследования советских ученых Н. И. Федынина и М. И. Диаманта [15] показали, что водопотребность

доменного гранулированного шлака можно снизить путем его частичного либо полного измельчения. Так, водопотребность шлака грубого помола (на бегунах) составляет 12 – 19 %. По мнению ученых, это связано с тем, что наибольшую пористость имеют крупные зерна, и при их измельчении, с повышением количества мелких фракций, средняя и насыпная плотность шлака увеличиваются. При этом межзерновая пустотность доменного гранулированного шлака, несмотря на увеличение удельной поверхности и уменьшение крупности зерен, практически не изменяется.

Основные физико-механические свойства исследуемого доменного граншлака определялись в соответствии с ГОСТом 9758-86 [9] (водопотребность) и ДСТУ Б В.2.7-232:2010 [2]. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2
Физико-механические свойства доменного гранулированного шлака

№ пробы	Истинная плотность, г/см ³	Насыпная плотность, кг/м ³	Пустотность, %	Модуль крупности	Водопотребность, %
1	2,6	780	70	3,2	35,73
2	2,59	805	69	3,42	34,42

Исследуемый доменный гранулированный шлак характеризуется высокими показателями пустотности и водопотребности, низким значением насыпной плотности. Это связано с тем, что он имеет не оптимальный гранулометрический состав и низкую плотность упаковки частиц. Его модуль крупности, равный 3,2 и 3,42, позволяет отнести данный шлак к мелким заполнителям высокой крупности.

Выводы. 1. Проведенные исследования основных физико-химических и механических характеристик доменных гранулированных шлаков завода им. Петровского показали, что они в проектируемых составах мелкозернистых бетонов могут выполнять не только роль заполнителя, но и роль наполнителя, заменяющего часть вяжущего. Исследуемые шлаки имеют коэффициент качества 1,59 – 1,62 и содержат в своем минералогическом составе высокое количество реакционноспособной стеклофазы.

2. Структура шлаковых зерен пористая, частицы в значительной степени остеклованы. Поры имеют преимущественно неправильную продолговатую форму, некоторые сквозные щелевидные.

3. Основные физико-механические свойства доменных гранулированных шлаков имеют неудовлетворительные показатели для получения плотных мелкозернистых бетонов. Гранулометрический состав не имеет оптимального соотношения крупных и мелких фракций, вследствие чего высокими являются показатели пустотности и водопотребности данных шлаков.

Таким образом, для улучшения физико-механических и других свойств шлаков и получения высококачественных прочных мелкозернистых бетонов на их основе целесообразно провести предварительную обработку доменных гранулированных шлаков. Наиболее эффективной, с нашей точки зрения, может быть их механическая активация.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Баженов Ю. М.** Технология бетонов : [учеб. пособ., 2-е изд.] / Юрий Михайлович Баженов. – М. : Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.
2. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань : ДСТУ БВ. 2.7-232:2010. – [Чинний від 2011-01-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2010. – 44 с. – (Національні стандарти України).
3. **Вешнякова Л. А.** Оптимизация гранулометрического состава смесей для получения мелкозернистых бетонов / Л. А. Вешнякова, А. М. Айзенштадт // Промышленное и гражданское строительство. – 2012. – № 10. – С. 19 – 22.
4. **Волженский А. В.** Минеральные вяжущие вещества (технология и свойства) : [учеб. для вузов]. – 3-е изд., перераб. и доп. / А. В. Волженский, Ю. С. Буров, В. С. Колокольников. – М. : Стройиздат, 1979. – 476 с.
5. **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.

6. **Горшков В. С.** Термография строительных материалов / В. С. Горшков. – М. : Издательство литературы по строительству, 1968. – 237 с.

7. **Гусев Б. В.** Свойства мелкозернистых бетонов при различных способах уплотнения / Б. В. Гусев, И. Н. Минсадров, В. Д. Кудрявцева // Промышленное и гражданское строительство. – 2009. – № 5. – С. 48 – 50.

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. Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний : ГОСТ 9758-86. – [Действующий от 1988-01-01]. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 40 с. – (Национальные стандарты Украины).

10. **Львович К. И.** Выбор песков для песчаного бетона / К. И. Львович // Бетон и железобетон. – 1994. – № 2. – С. 12 – 16.

11. **Мельниченко Л. Г.** Технология силикатов / Л. Г. Мельниченко, Б. П. Сахаров, Н. А. Сидоров // Под ред. проф. М. А. Матвеева. – М. : Высш. школа, 1969. – 360 с.

12. **Мирюк О. А.** Мелкозернистые бетоны на основе техногенного заполнителя / О. А. Мирюк // Бетон и железобетон в Украине. – 2010. – № 2. – С. 5 – 8.

13. **Морозов Н. М.** Песчаный бетон высокой прочности / Н. М. Морозов, В. Г. Хозин // Строительные материалы. – 2005. – № 11. – С. 25 – 26.

14. Пути повышения эффективности мелкозернистого бетона / Р. В. Лесовик, А. И. Топчиев, М. С. Агеева [и др.] // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2007. – № 7. – С. 16-17.

15. **Федынин Н. И.** Высокопрочный мелкозернистый шлакобетон / Н. И. Федынин, М. И. Диамант. – М. : Стройиздат, 1975. – 176 с.

16. **Щербак С. А.** Научные основы управления структурой строительных материалов на основе металлургических шлаков : дисс. ... докт. техн. наук : 05.23.05 / Щербак Святослав Андреевич. – Днепропетровск, 2001. – 345 с.

17. **Элинзон М. П.** Шлаки / Марк Петрович Элинзон. – М. : Госстройиздат, 1959. – 137 с.

18. **Mudersbach D.** Verringerung der Porosität von Hochofenstüchschlacken / D. Mudersbach, M. Kühn, J. Pethke, T. Stisovic // Report des FehS-Instituts. – 2004. – № 2. – P. 5 – 6.

SUMMARY

Statement of the problem. Fundamental properties of fine concrete, affecting its durability and life cycle of article made of it, such as strength, deformability, chemical resistance and others, largely depend on the characteristics of the aggregate used. With decreasing of fineness modulus of aggregate, its influence on the properties of concrete mix and hardened concrete increases.

At the same time, both in Ukraine and abroad the problem of shortage of quality natural fine aggregate for concrete exacerbates. Besides, low- quality sand in composition of fine concrete can be replaced by secondary material resources - industrial waste. Application of waste product of ferrous metallurgy - granulated blast-furnace slag is the most effective. As it was stated previously [15], granulated blast-furnace slag in composition of Portland cement concrete acts as an active micro filler. Its surface layer reacts with calcium hydroxide that is released during cement hydrolysis. This produces an additional amount of calcium hydrosilicate, creating an extremely strong bond of aggregate with cement matrix. This greatly improves adhesive strength of concrete, its corrosion resistance and a number of other physical and mechanical characteristics. Application of slag will reduce the cost of fine concrete and free land areas from slag dumps and improve the environmental situation in the country.

Analysis of publications. A series of works of such scientists as V. I. Babushkin, V. I. Bolshakov, P. P. Budnikov, Yu. M. Butt, A. V. Volzhenskiy, V. D. Glukhovskiy, P. V. Krivenko, V. F. Krylov, V. V. Lapin, A. S. Mironov, I. A. Pashkov, G. V. Pukhalskiy, S. M. Royak, R. F. Runova, N. I. Fedynin, S. V. Shestoperov, S. A. Shcherbak, M. P. Elinzon, V. N. Yung and many others, is devoted to studying of the properties of metallurgical slag, and construction materials and articles made on its basis.

The purpose of the work is to examine the basic properties of granulated blast-furnace slag, affecting the quality of fine concrete, in order to identify what kind of slag treatment is the most appropriate when producing durable concrete.

Conclusions. 1. Studies of basic physical-chemical and mechanical characteristics of granulated blast-furnace slag of Petrovsky works has shown that it can be not only an aggregate in composition of fine concrete, but also a filler that replaces part of a binder. The studied slag has a quality factor of 1,59 – 1,62 and contains a high number of reactive glass phase in its mineralogical composition.

2. Structure of slag grains is porous; particles are largely vitrified. Pores are predominantly irregular oblong; some of them are through slit-like.

3. Basic physical and mechanical properties of granulated blast-furnace slag have poor performance for dense fine concrete. Granulometric composition does not have the optimal ratio of coarse and fine fractions that causes high voidage and water requirement of the slag.

Thus, to improve physical-mechanical and other properties of slag and to produce high-quality strong fine concrete on its base, it is expedient to carry out pre-processing of granulated blast-furnace slag. The most effective, from our point of view, may be its mechanical activation.

REFERENCES

1. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betonov* : [ucheb. posobiye. 2-ye izd.] / Yuriy Mikhaylovich Bazhenov. – Moscow. : Izdatelstvo ASV, 2002. – 500 s.

2. *Budivelni materialy. Pisok dlia budivelnykh robot. Metody vyprobuvan* : DSTU BV. 2.7-232:2010. – [Chynnyi vid 2011-01-01]. – Kyiv. : Minrehionbud Ukrainy, 2010. – 44 s. – (Natsionalni standarty Ukrainy).

3. Veshniakova L. A. *Optimizatsiya granulometricheskogo sostava smesey dlya polucheniya melkozernistykh betonov* / L. A. Veshniakova, A. M. Ayzenshtadt // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. – 2012. – № 10. – S. 19 – 22.

4. Volzhenskiy A. V. *Mineralnyye vyazhushchyye veshchestva (tekhnologiya i svoystva)* : [ucheb. dlya vuzov]. – 3-ye izd., pererab. i dop. / A. V. Volzhenskiy, Yu. S. Burov, V. S. Kolokolnikov. – M. : Stroyizdat, 1979. – 476 s.

5. Gorshkov V. S. *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchykh veshchestv* : [ucheb. posobiye] / V. S. Gorshkov, V. V. Timashev, V. G. Savelyev. – M. : Vysshaya shkola, 1981. – 335 s.

6. Gorshkov V. S. *Termografiya stroitelnykh materialov* / V. S. Gorshkov. – M. : Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1968. – 237 s.

7. Gusev B. V. *Svoystva melkozernistykh betonov pri razlichnykh sposobakh uplotneniya* / B. V. Gusev, I. N. Minsadrov, V. D. Kudryavtseva // *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo*. – 2009. – № 5. – S. 48 – 50.

8. Dvorkin L. I. *Stroitelnyye materialy iz otkhodov promyshlennosti* : [uchebno-spravochnoye posobiye] / L. I. Dvorkin, O. L. Dvorkin. – Rostov-on-Don : Feniks, 2007. – 368 s.

9. *Zapolniteli poristyye neorganicheskiye dlya stroitelnykh rabot. Metody ispytaniy* : GOST 9758-86. – [Deystvuyushchyy ot 1988-01-01]. – M. : Izdatelstvo standartov, 1986. – 40 s. – (Natsionalnyye standarty Ukrainy).

10. Lvovich K. I. *Vybor peskov dlya peschanogo betona* / K. I. Lvovich // *Beton i zhelezobeton*. – 1994. – № 2. – S. 12 – 16.

11. Melnichenko L. G. *Tekhnologiya silikatov* / L. G. Melnichenko, B. P. Sakharov, N. A. Sidorov : pod red. prof. M. A. Matveyeva. – M. : Vysshaya shkola, 1969. – 360 s.

12. Miryuk O. A. *Melkozernistyye betony na osnove tekhnogenogo zapolnitelya* / O. A. Miryuk // *Beton i zhelezobeton v Ukraine*. – 2010. – № 2. – S. 5 – 8.

13. Morozov N. M. *Peschanyy beton vysokoy prochnosti* / N. M. Morozov, V. G. Khozin // *Stroitelnyye materialy*. – 2005. – № 11. – S. 25 – 26.

14. *Puti povysheniya effektivnosti melkozernistogo betona* / R. V. Lesovik, A. I. Topchiyev, M. S. Ageyeva [i dr.] // *Stroitelnyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. – 2007. – № 7. – S. 16 – 17.

15. Fedynin N. I. *Vysokoprochnyy melkozernisty shlakobeton* / N. I. Fedynin, M. I. Diamant. – M. : Stroyizdat, 1975. – 176 s.

16. Shcherbak S. A. *Nauchnyye osnovy upravleniya strukturoy stroitelnykh materialov na osnove metallurgicheskikh shlakov* : diss. ... dokt. tekhn. nauk : 05.23.05 / Shcherbak Svyatoslav Andreyevich. – Dnepropetrovsk, 2001. – 345 s.

17. Elinzon M. P. *Shlaki* / Mark Petrovich Elinzon. – Moscow : Gosstroyizdat, 1959. – 137 s.

18. Mundersbach D. *Verringerung der Porosität von Hochofenstüchschlacken* / D. Mundersbach, M. Kühn, J. Pethke, T. Stisovic // *Report des FehS-Instituts*. – 2004. – № 2. – S. 5 – 6.

УДК 666.972.124:691.3

Свойства доменных гранулированных шлаков, влияющие на качество мелкозернистого бетона / М. А. Елисеева // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПГАСА, 2014. – № 4. – С. 30 – 38. – рис. 4. – табл. 2. – Библиогр.: (18 назв.).

Рассматриваются основные свойства доменных гранулированных шлаков и их влияние на качество получаемого мелкозернистого бетона. Приводятся характеристики исследованных доменных гранулированных шлаков металлургического завода им. Петровского. Дается оценка целесообразности их использования в качестве мелкого заполнителя для бетонов.

Ключевые слова: доменные гранулированные шлаки, мелкие заполнители бетона, физико-механические свойства, химический состав, минералогический состав, микроструктура, гранулометрический состав, плотность, пустотность, водопотребность.

Властивості доменних гранульованих шлаків, які впливають на якість дрібнозернистого бетону / М. О. Єлісеєва // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д. : ПДАБА, 2014. – № 4. – С. 30 – 38. – рис. 4. – табл. 2. – Бібліогр.: (18 назв.).

Розглядаються основні властивості доменних гранульованих шлаків та їх вплив на якість одержуваного дрібнозернистого бетону. Наводяться характеристики досліджених доменних гранульованих шлаків металургійного заводу ім. Петровського. Дається оцінка доцільності їх використання як дрібного заповнювача для бетонів.

Ключові слова: доменні гранульовані шлаки, дрібні заповнювачі бетону, фізико-механічні властивості, хімічний склад, мінералогічний склад, микроструктура, гранулометричний склад, густина, пустотність, водопотреба.

Properties of granulated blast-furnace slags influencing on the quality of fine concrete / M. Yeliseyeva // Visnyk of Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture. – D. : PSACEA, 2014. – № 4. – P. 30 – 38. – pic. 4. – tabl. 2. - Bibliogr.: (18 names).

The basic properties of the granulated blast-furnace slags and their effect on the quality of the fine concrete product are considered in the article. Characteristics of the tested granulated blast-furnace slags of Petrovskiy metallurgical works are given. The appropriateness of their use as a fine aggregate for concretes is evaluated.

Keywords: granulated blast-furnace slags, fine aggregates for concrete, physical-mechanical properties, chemical composition, mineralogical composition, microstructure, granulometric composition, density, voidage, water requirements.