

НАУКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 669.431.6:666.972.124

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ДОМЕННЫХ ГРАНУЛИРОВАННЫХ ШЛАКОВ НА ИХ СВОЙСТВА

В. И. Большаков, д. т. н., проф., М. А. Елисеева, асс., С. А. Щербак, д. т. н., проф.

Ключевые слова: доменные гранулированные шлаки, заполнители бетона, высокоскоростная обработка, механическая активация, обогащение, смеситель-активатор роторного типа, физико-механические свойства, аморфизация

Постановка проблемы. основополагающие свойства бетонов, влияющие на их долговечность и срок службы изготовленного из них изделия, такие как прочность, деформативность, химическая стойкость и прочие, во многом зависят от свойств применяемого заполнителя. С уменьшением модуля крупности заполнителя его влияние на свойства бетонной смеси и затвердевшего бетона возрастает. При этом в объеме бетона заполнители могут занимать до 80 %, а их стоимость может составлять до 30 – 50 % от себестоимости бетонных и железобетонных конструкций, поэтому необходимо вовлечение в строительную отрасль доступных и дешевых заполнителей. Это снизит стоимость строительства, уменьшит объем транспортных перевозок [1]. Решить эти проблемы можно используя в качестве заполнителей вторичные материальные ресурсы, что позволит приостановить рост отвалов в районах расположения промышленных заводов.

В Приднепровском регионе одними из наиболее крупнотоннажных отходов являются шлаки черной металлургии, в частности, доменные гранулированные шлаки. Многие ученые, учитывая специфику структуры и физико-механических свойств доменных гранулированных шлаков для управления качеством строительных изделий, на их основе рекомендуют проводить специальную обработку шлаков перед использованием. Наиболее эффективной, с нашей точки зрения, является высокоскоростная обработка сырья, которая обеспечивает одновременное проведение обогащения, механической активации и домола материала, а, следовательно, способствует значительному улучшению ряда его свойств.

Анализ литературы. Многие исследователи как в нашей стране, так и за ее пределами занимаются проблемой повышения качества вторичных материальных ресурсов и получения на их основе эффективных, конкурентоспособных строительных материалов. Особый интерес ученых в последнее время вызывает высокоскоростная обработка материалов или их механическая активация. Современные разработки новых строительных материалов на основе механоактивированного сырья связаны с трудами И. В. Барабаша, С. И. Федоркина, Л. И. Дворкина, Л. А. Урхановой, Е. С. Шинкевич, В. П. Кузьминой, С. В. Дугуева, В. Б. Ивановой, В. С. Прокопца и др.

Целью работы является изучение основных свойств доменных гранулированных шлаков, используемых в качестве мелкого заполнителя в бетонах, до и после обработки в лабораторном смесителе-активаторе роторного типа.

Основная часть. В качестве мелкого заполнителя для бетонов нами использовался гранулированный доменный шлак производства ПАО «Евраз – Днепропетровский металлургический завод им. Петровского». Как известно [2], природное и техногенное сырье содержит радионуклиды (радий-226, торий-232, калий-40 и др.), являющиеся источниками γ -радиоизлучений. Количество этих веществ в составе техногенного сырья выше, чем в составе материалов естественного происхождения. Поэтому при использовании вторичных материальных ресурсов как сырья для производства строительных материалов и изделий необходимо производить оценку их радиационного качества, которое для строительных материалов устанавливается по величине удельной активности радионуклидов.

Радиологические исследования доменного гранулированного шлака выполнялись гамма-спектрометрическим методом измерения при помощи прибора СЭГ-001 «АКП-С». Результаты радиологического анализа представлены в таблице 1.

Таким образом, исследуемые образцы доменного гранулированного шлака производства ПАО «Евраз-Днепропетровский металлургический завод им. Петровского» по содержанию эффективной удельной активности природных радионуклидов соответствуют требованиям 1-го класса строительных материалов согласно ДБН В. 1.4-1.01-97 [3] ($A_{эф}$ не более 370 Бк/кг) и шлак может применяться для всех видов строительства.

В качестве активатора применялся лабораторный смеситель-активатор роторного типа РС-06, ударно-стирающего действия, техническая характеристика которого представлена в таблице 2.

Таблица 1

Радиационное качество доменного гранулированного шлака

№ п/п	Удельная активность радионуклидов, Бк/кг			$A_{эф}$, Бк/кг	Класс применения
	Торий-232	Радий-226	Калий-40		
1	25	54	<63	<93	Первый
2	23	68	<67	<104	Первый

Таблица 2

Техническая характеристика лабораторного смесителя-активатора РС-06

Технические характеристики установки	Единица измерения	Величина
Число оборотов ротора	мин.	1440
Число ребер на роторе	–	4
Скорость вращения на периферии рабочего органа	м/с	12
Внутренний диаметр корпуса смесителя и диаметр ротора	м	0,31
Внутренняя высота корпуса смесителя	м	0,305
Высота ротора	м	0,05
Мощность электродвигателя	кВт	7
Габаритные размеры:	м	
длина		1,3
ширина		0,7
высота		1
Масса	т	0,4
Внутренний объем смесителя, не более	м ³	0,027

Рабочим органом данной установки является ротор, представляющий собой усеченный конус, основанием которого служит меньший диаметр с перегородками, закрепленный на вертикальном валу. Он расположен внутри цилиндрического корпуса, в нижней его части, и приводится во вращение от электропривода посредством клиноременной передачи. Привод снабжен устройством для регулирования натяжения ремней.

Для установления рационального режима активации гранулированного доменного шлака были определены следующие его физико-механические свойства до и после обработки в активаторе: структура, насыпная плотность, пустотность, водопотребность, модуль крупности, гранулометрический состав и степень аморфизации.

Исследуемый доменный гранулированный шлак в количестве 8 кг увлажнялся 5 % воды и помещался в емкость смесителя-активатора. Время обработки изменялось с интервалом в 15" при скорости вращения ротора 12 м/с. После этого обработанный шлак высушивался и подвергался рассеву согласно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 [4]. Кроме того, определялись основные физико-механические свойства полученного продукта в соответствии с ГОСТом 9758-86 [5] (водопотребность) и ДСТУ Б В.2.7-232:2010 [4]. Результаты испытаний представлены в таблице 3 и на рисунке 1.

Гранулометрический состав доменного гранулированного шлака

Время активации, с	Частные остатки, % по массе, на контрольных ситах с размером отверстий сит, мм						
	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Дно
0	16,0	19,0	21,2	33,0	18,0	5,5	3,3
15	3,2	10,5	14,0	22,0	16,5	17,5	19,5
30	1,25	6,0	16,0	23,0	17,5	16,0	21,5
45	0,75	7,5	15,0	18,0	19,5	17,5	22,5
60	0,29	5,5	13,5	20,0	18,0	20,0	23,0
90	0,25	4,5	13,5	17,5	22,0	17,0	25,5

Как показали результаты исследований (табл. 3), обработанный гранулированный шлак, по сравнению с исходным, характеризуется пониженным содержанием крупных фракций (5 – 2,5 мм) и повышенным содержанием мелких фракций (0,16 мм и менее). Так, в обработанном шлаке количество зерен размером 5 мм уменьшилось с 13 – 16 % до 0,25 – 3 %, а количество зерен размером менее 0,16 мм увеличилось с 2,0 – 3,5 % до 19,5 – 25,5 %. Мелкие фракции активированного шлака при его использовании в бетоне могут играть роль активного минерального микрозаполнителя.

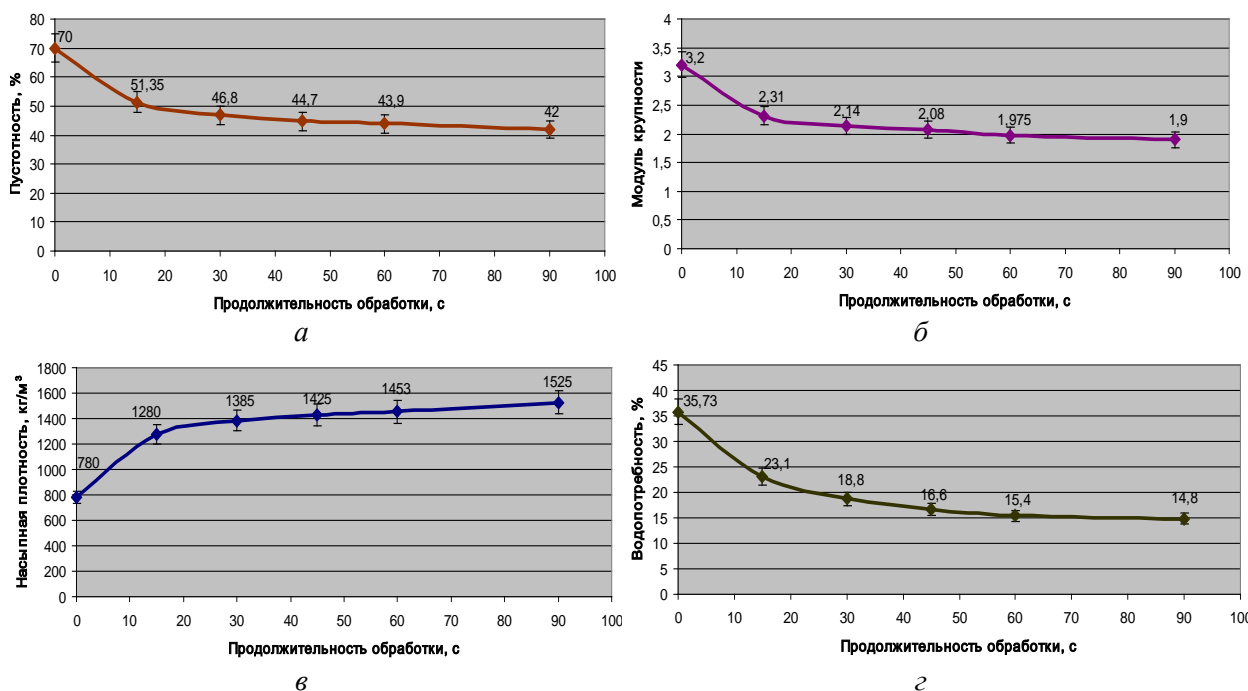


Рис. 1. Графики зависимости свойств доменного гранулированного шлака от продолжительности обработки в смесителе-активаторе:
а – пустотность; б – модуль крупности; в – насыпная плотность;
г – водопотребность

Согласно данным, представленным на рисунке 1: модуль крупности, водопотребность и пустотность шлака уменьшаются с повышением времени обработки в смесителе-активаторе, а его насыпная плотность, наоборот, увеличивается. Однако эффективность обработки наиболее велика в первые секунды. Оптимальные значения основных физико-механических свойств соответствуют шлаку, обработанному в течение 30 – 45". Дальнейшая обработка нецелесообразна, так как требует значительных энергозатрат без существенного улучшения свойств обрабатываемого шлака.

Структура доменного гранулированного шлака до и после обработки в смесителе-активаторе также отличается (рис. 2).

Результаты исследований (рис. 2) показали, что активированный заполнитель практически

не имеет пор и характеризуется более светлым цветом, чем образец неактивированного материала. Этот фактор объясняется уменьшением размеров частиц обработанного шлака. Кроме того, изменилась морфология поверхности активированных частиц. Вместо гладкой поверхности, как у необработанного в активаторе шлака, она стала высокоразвитой рельефной. В целом структура поверхностных слоев частиц шлака приобрела разрыхленный аморфизированный вид. Это свидетельствует о механической деструкции материала после его активации. Как известно [6; 7], аморфизированная поверхность любого материала является активной подложкой, на которой во время гидратации формируются минералы системы.

Определение физико-химических изменений, произошедших в обработанном гранулированном шлаке, проводилось при помощи рентгенографического анализа. Исследования осуществлялись на дифрактометре ДРОН-4 с трубкой из медного анода БСВ-23. Съёмка выполнялась в Си излучении, отфильтрованном отражением от плоского монохроматора из графита, который располагался на вторичном пучке перед счетчиком.

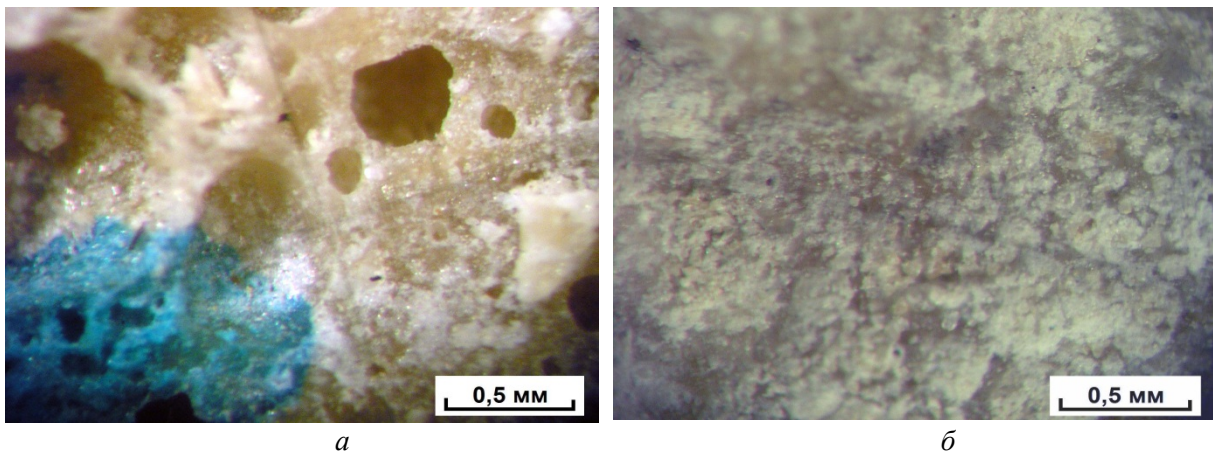


Рис. 2. Структура частицы доменного гранулированного шлака:
а – неактивированной. Голубое пятно в нижнем левом углу появилось в результате нашего окрашивания этой зоны частички маркером; б – активированной 45" в смесителе-активаторе

Полученные дифрактограммы порошков заполнителя (рис. 3) свидетельствуют об искажении кристаллической решетки поверхностных слоев активированного доменного гранулированного шлака и аморфизации его поверхности. С увеличением продолжительности обработки относительная интенсивность пиков уменьшается, а их ширина, наоборот, возрастает.

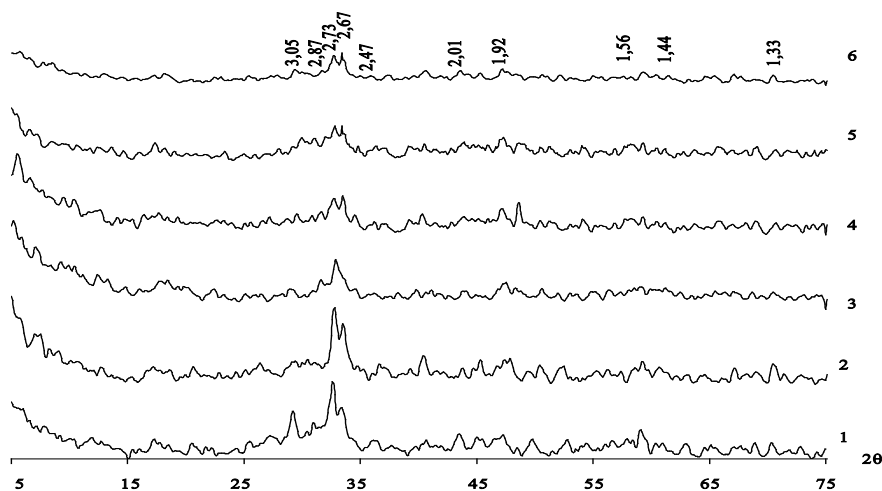


Рис. 3. Дифрактограммы порошков доменного гранулированного шлака:
1 – исходный; 2 – 6 – активированный в течение 15, 30, 45, 60 и 90" соответственно

Степень аморфизации материала, согласно работе [8], можно рассчитать по следующей формуле:

$$A = 100 - K, \quad (1)$$

где K – коэффициент аморфизации, рассчитываемый по формуле:

$$K = \frac{I_{\text{изм}}}{I_{\text{исх}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $I_{\text{изм}}$ – интенсивность основных рефлексов, активированной пробы материала; $I_{\text{исх}}$ – интенсивность исходной пробы материала. При этом принимается, что исходный материал является кристаллическим и не содержит аморфной фазы.

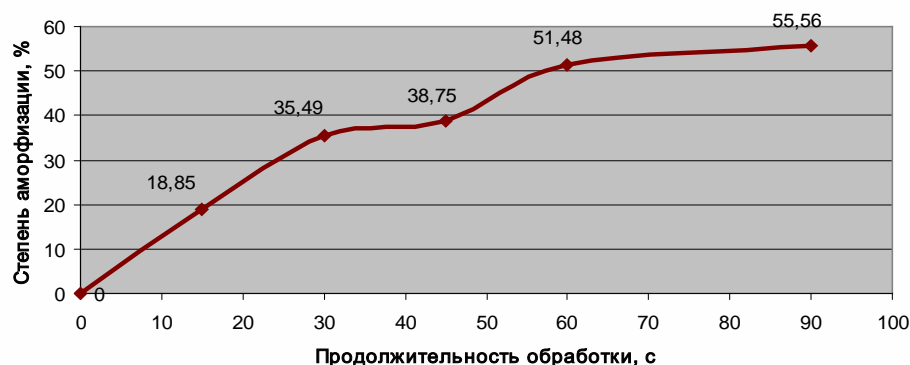


Рис. 4. Изменение аморфизации доменного гранулированного шлака при активации

Наибольшую степень аморфизации имеет шлак, активированный 45, 60 и 90" (рис. 4).

На основании проведенных исследований рекомендуемое время обработки доменных гранулированных шлаков в лабораторном смесителе-активаторе роторного типа составляет 45 – 60".

Преимуществом представленного смесителя-активатора является и то, что при изготовлении бетонных смесей он позволяет проводить одновременно перемешивание, обогащение и активацию с частичным домолом компонентов бетонной смеси в присутствии необходимого количества воды. Приготовление смесей формовочной влажности дает возможность повысить их качество и значительно упростить технологический процесс изготовления изделий. Исключаются затраты, связанные с обустройством дополнительных смесительных установок и транспортировки к ним активированных смесей.

Выводы. Как показали результаты исследований, высокоскоростная обработка доменных гранулированных шлаков в лабораторном смесителе-активаторе роторного типа позволила достигнуть следующих положительных результатов:

- улучшить гранулометрический состав заполнителя, а именно, уменьшить содержание крупных фракций с 13 – 16 % до 0,25 – 3 %, увеличить содержание более активных средних и мелких фракций;

- снизить величины пустотности, модуля крупности и водопотребности, повысить значение насыпной плотности используемых шлаков, что является необходимым условием для получения прочных бетонов. Так, для заполнителя, активируемого 45", значение его насыпной плотности увеличилось на 77 – 82 %, величины пустотности, модуля крупности и водопотребности уменьшились соответственно на 35 – 36 %, 36 – 40 % и 51 – 53 %;

- видоизменить структуру поверхностных слоев частиц шлака, которая приобрела разрыхленный аморфизированный вид;

- увеличить степень аморфизации доменных гранулированных шлаков на 18,9; 35,5; 38,8; 51,5 и 55,6 % при времени активации 15, 30, 45, 60 и 90 секунд соответственно.

Таким образом, обработанные доменные гранулированные шлаки с улучшенными свойствами позволят получить качественные конкурентоспособные изделия, изготовленные на их основе.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Баженов Ю. М.** Технология бетонов: [учеб. пособие, 2-е изд.] / Юрий Михайлович Баженов. – М. : Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.
2. Радиационное качество жилых зданий и пути его обеспечения: [учеб. пособие] /

[И. А. Соколов, В. Ф. Запрудин, А. С. Беликов и др.]. – Д. : ПГАСА, 2007. – 348 с.

3. Система норм та правил зниження рівня іонізуючих випромінювань природних радіонуклідів в будівництві. Регламентовані радіаційні параметри. Допустимі рівні : ДБН В. 1.4-1.01-97. – [Чинний від 1998-01-01]. – К. : Государственный комитет Украины по делам градостроительства и архитектуры, 1997. – 16 с. – (Національні стандарти України).

4. 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).

5. 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).

6. **Федынин Н. И.** Высокопрочный мелкозернистый шлакобетон / [Н. И. Федьнин, М. И. Диамант]. – М. : Стройиздат, 1975. – 176 с.

7. **Шинкевич Е. С.** Технологические особенности производства силикатных изделий неавтоклавного твердения / Е. С. Шинкевич, Е. С. Луцкий // Строительные материалы. – 2008. – № 11. – С. 54 – 56.

8. **Молчанов В. И.** Физические и химические свойства тонкодиспергированных минералов / В. И. Молчанов, Т. С. Юсупов. – М. : Недра, 1981. – 160 с.

УДК 624.048

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСНОВАНИЯ В СИСТЕМЕ «ОСНОВАНИЕ – СООРУЖЕНИЕ» ПРИ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ В РАСЧЕТНОМ КОМПЛЕКСЕ ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL

В. Л. Седин, д. т. н., проф., В. А. Загильский, студ., А. Г. Ефименко, студ.

Ключевые слова: статические воздействия, грунтовые основания, расчетные модели

Постановка проблемы. В последнее время отечественные и зарубежные исследователи проявляют повышенный интерес к методам учета грунтового основания при статических нагрузках в системе «основание – сооружение». Существует множество расчетных комплексов, в которых возможен учет грунтового основания. Одним из них является Robot Structural Analysis Professional (RSAP).

Цель статьи. В связи с этим были выполнены численные и аналитические исследования расчетных моделей грунтового основания, целью которых является проверка адекватности рассчитываемых моделей в программном комплексе RSAP.

Анализ публикаций. Для моделирования грунта в системе «основание – сооружение» используют различные комплексы программ. Наиболее распространенными являются «Plaxis», «SCAD», «Лира» и т. п. [1; 3]. Все программные комплексы имеют свои особенности, которые могут ограничивать сферу их использования. Как показывает инженерный опыт, главным при проведении расчетов оснований и фундаментов с помощью численных методов является составление расчетной схемы, которая должна максимально соответствовать действительной работе конструкции. Программа RSAP была специально разработана для анализа поведения конструкций, в том числе и в системе «основание – сооружение» [4].

Изложение материала. Для анализа передачи статических воздействий через грунт рассмотрим следующие модели учета основания:

1. Регламентируемый аналитический метод (метод послойного суммирования).
2. Численный метод (учет основания при помощи коэффициентов постели, расчетный комплекс RSAP).
3. Численный метод (учет основания при помощи объемных элементов, расчетный комплекс RSAP).

Была рассмотрена следующая тестовая задача: расчет осадки отдельно стоящего плитного фундамента, глубинной заложения $d = 2,0$ м, размерами в плане $l = 10$ м, $b = 10$ м с равномерно распределенной нагрузкой, равной 100 кПа (давление от сооружения).

Расчет деформаций основания методом послойного суммирования выполняется с применением расчетной схемы в виде линейно-деформированного полупространства с