

vodosnab-zhenija v Uzbekistane // Jekologicheskij Vestnik. – 2012. – № 7. – S. 12–14.

4. *Chembarisov Je.I., Hozhamuratova R.T.* Prakticheskaja gidrojekologija. Nukus: izdatel'stvo «Fan», 2012. – 84 s.

Information about the author

Usmanov Islam Abbasovich, doctor of medical sciences, senior researcher; head of the laboratory of Hydroecology and protection of water resources; Scientific research Institute of irrigation and water problems; the Republic of Uzbekistan, 100187, Tashkent, Mirzo-Ulugbekskij rajon, massiv Karasu-4,

d.11; phone: +99871 265-93-41; e-mail: islamabbasovich@gmail.com.

Для цитирования: **Усманов И.А.** Совершенствование экологического мониторинга за водоемами бассейна среднего течения реки Сырдарьи // Экология и строительство. – 2017. – № 1. – С. 10–14.

For citations: **Usmanov I.A.** The improvement of ecological monitoring for water bodies of the middle course of Syrdarya river // *Ekologiya & Stroitelstvo*. – 2017. – № 1. – P. 10–14.

УДК 502/504

К ВОПРОСУ СОСТОЯНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Поступила 04.04.2017 г.

© **Усов Борис Александрович¹, Окольников Галина Эриковна², Акимов Сергей Юрьевич³**

¹ Акционерное общество «Ассоциация композитных строительных материалов», г. Москва

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов», г. Москва

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва

TO THE QUESTION OF INNOVATIVE DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF MANUFACTURE OF BUILDING MATERIALS FROM INDUSTRIAL WASTE

Received on April 04, 2017

© **Usov Boris Aleksandrovich¹, Okolnikova Galina Erikovna², Akimov Sergey Yurievich³**

¹ Public company «Associaciya kompozitnykh stroitelnykh materialov», Moscow, Russia

² Russian University of Friendship of People, Moscow, Russia

³ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Статья посвящена рассмотрению вопроса состояния инновационных направлений развития производства строительных материалов из отходов промышленности. Отмечается, что отходы сельского производства – костру (паклю) лубяных растений (льна, конопли и др.), солому и др. можно использовать для получения теплоизоляционных и звукоизоляционных плит, листов и плит для отделочных работ (полов, стен).

Ключевые слова: отходы производства, строительные материалы, экология.

The article is devoted to consideration of innovative directions of development of production of building materials from waste industry. It is noted that the waste of agricultural production – the fire (tow) bast plants (flax, hemp, etc.), straw, etc. can be used for obtaining thermal and sound insulation plates, sheets and slabs for finishing works (floors, walls).

Keywords: production waste, building materials, ecology.

Введение. Экология – наука об отношении человека с окружающей природной средой возникла в конце XIX века.

Изменение окружающей среды и экологические проблемы непосредственно связаны с ростом промышленного производства, увеличившимся за XX столетие более чем в 50 раз, и 4/5 этого роста пришлось на период с 1950 г.

Любое производство в основном базируется на изъятии природного сырья и переработке его в требуемый продукт, сопровождаемый образованием техногенных отходов и загрязнением ими природных сред. Количество образующихся техногенных отходов напрямую связано с объемами производства основного вида продукции и совершенством технологии ее получения.

Техногенные отходы загрязняют атмосферный воздух, занимают и загрязняют землю, грунтовые водоемы. Все отходы в зависимости от их токсичности подразделяются на четыре класса: I – чрезвычайно опасное вещество; II – высокоопасное вещество; III – умеренно опасное вещество; IV – малоопасное вещество.

Отходы I класса опасности направляются на захоронение в «могильники» для бессрочного захоронения, менее опасные – в шламонакопители, хвостохранилища, отвалы и т.д., под которые занято более 100 тыс. гектаров земли. Общее количество отходов, накопленных на этих отвалах, не поддается учету.

Предприятиями промышленности строительных материалов осуществляется выброс вредных веществ в атмосферу в виде пыли и

взвешенных частиц (более 50% от суммарного выброса), а также оксида углерода, диоксида серы, оксидов азота и других веществ.

Из этих выбросов более 40% приходится на цементную промышленность, 18...20% – на производство кровельно-изоляционных материалов, 10% – на асбестоцементные производства, 15% – на нерудные строительные материалы, менее 10% – на производство бетонных и железобетонных конструкций и изделий.

Однако доля загрязняющих выбросов в атмосферу от промышленности стройматериалов России составляет 3,2%. Основной объем – приходится на

топливоэнергетический комплекс (48,4% – выбросов в атмосферу, 26,7% сбросов загрязняющих сточные воды свыше 30% твердых отходов). На цветную металлургию – 21,6%, состоящие из твердых отходов (отвальные металлургические шлаки, хвосты обогащения руд вскрышные породы); черную металлургию (15,2% в виде 90 млн т, включая – 50 млн т доменных шлаков, 22 млн т – сталеплавильных, 4 млн т – ферросплавных) некоторые химические производства – в виде шламов, отработанной соляной и серных кислот, дистерных жидкостей и шламов аммиачно-хлоридных производств, кальцинированной соды, фосфогипса, фторогипса и т.д. – то есть главным образом отходы четвертого класса, что допускает их размещение в производстве строительных материалов.

А в целом из указанных выше отходов – приводит к необходимости создания «вторичных», но уже техногенных месторождений [3].

Производство цемента является крупным источником образования оксида углерода: на 1 т цемента – 1 т CO₂, на 1 т клинкера – от 1,5 до 9,5 кг оксидов азота, твердых частиц с дымовыми газами – от 0,3 до 1,0 кг/т. Хотя значительная часть цементной пыли улавливается фильтрами и вновь направляется в печь.

Так что многие техногенные отходы по своему химико-минералогическому составу близки природному минеральному сырью и могут частично или полностью использоваться при производстве цементов, бесклинкерных вяжущих, заполнителей, что позволит сохранять природные ресурсы. К сожалению в ряде производств лишь незначительная часть потребляемых природных ресурсов превращается в требуемую конечную продукцию, а основное количество переходит в техногенные отходы.

На их удаление затрачивается в среднем 8...10% стоимости производимой продукции на складирование твердых отходов только от Московских предприятий по области требуется ежегодно выделение до 20 га земли. И к тому же их транспортирование и складирование поглощают миллиарды рублей.

Поэтому использование таких отходов становится первоочередной мировой проблемой ресурсосбережения природного сырья.

Вместе с тем проблему наличия отходов возможно рассматривать и как огромное дополнительное инновационное богатство, если правильно их использовать.

В пользу этого приоритета свидетельствует, то обстоятельство, что наиболее емким потребителем промышленных отходов различных отраслей являются крупные объемы производства строительных материалов, поскольку многие отходы по своему составу и свойствам аналогичны природному сырью для их производства. Удельный вес сырья из них достигает более 50%.

Установлено, что промышленные отходы позволяют покрыть до 40% потребности строительства в сырьевых ресурсах. Кроме того промышленные отходы в ряде случаев позволяют на 10...30% снизить затраты на изготовление строительных материалов по сравнению с производством из природного сырья. Из промышленных отходов возможно создавать новые строительные материалы с высокими технико-экономическими показателями.

Однако рост массы перерабатываемых материалов сопровождается и значительным увеличением количества отходов, оказывающих отрицательное воздействие на биосферу.

Поэтому экологический критерий при отборе наиболее прогрессивных технологий становится решающим.

При этом важен поиск не только экономически и экологически эффективного производства, но главное их оптимального сочетания.

Инновационные решения экологических проблем окружающей среды в сфере производства строительных материалов осуществляются по следующим направлениям:

первое – выявление объемов и исследование характера отходов производства, загрязняющих окружающую среду, и их складирование с установлением путей их ликвидации действиями, направленными на дальнейшую их переработку.

второе – улавливание и утилизация вредных для окружающей среды твердых отходов с внедрением технологических решений по комплексной пе-

реработке такого сырья или использование как вторичных продуктов других отраслей промышленности.

третье – создание экологически «чистых» безотходных технологий с полным исключением загрязнения окружающей среды.

Мероприятия по первому направлению в основном определены. Отходы либо подготавливаются к вторичному использованию, либо подлежат захоронению.

Широко развернуты работы по охране экологии по второму направлению: снижается энергоемкость производства за счет оснащения основных технологических агрегатов тепло утилизирующими установками и широкой подготовки различных отходов (шламов, шлаков, зол и т.д.) к повторному применению. То есть по отношению к промышленным отходам в материальном производстве воплощается уже новая степень охраны экологии – идея комплексных инновационных систем переработки сырья. Например, при создании крупных металлургических или энергетических комплексов одновременно предусматривается подготовка отходов к использованию в производстве строительных материалов. Так появились и широко используются гранулированные металлургические шлаки для производства шлакопортландцемента, шлаковой пемзы, шлаковаты и т.д. Имеется опыт применения для этих целей и отвальных шлаков, флотационных хвостов и т.п.

Определился положительный опыт использования шлаков и в качестве заполнителя бетона, а бетонных отходов – в качестве низкомарочного вяжущего или в виде дробленого заполнителя для получения бетонов марок до 200 кг/см². Но использование этого сырья в производстве строительных материалов и особенно при изготовлении самого распространенного и универсального материала – обычного бетона осуществляется еще недостаточно.

Таким образом технологовстройматериальщиков из массовых неорганических промышленных отходов в первую очередь привлекают металлургические шлаки, топливные отходы (золы, шлаки), а также отвальные углесодержащие породы – отходы при добыче каменного угля. Сегодня успешно находят применение различные отходы пылевидного микрокремнезема в

виде ферросилициума и др. соединений даже цветной металлургии. При производстве 1 т чугуна образуется около 0,7 т доменных (шлаковых) расплавов.

Однако к сожалению, в производстве строительных материалов используется лишь около половины шлаковых отходов; остальное – направляется в отвал. Часть отвальных шлаков применяют как щебень при строительстве дорог. Однако в связи с медленным остыванием непосредственных отходов – расплавов шлака в отвалах, содержащих еще и примеси расплавленного железа и поэтому приобретающих высокую прочность, производство щебня сопряжено с очень высокими затратами (взрывными работами и очень дорогим дроблением).

С другой стороны из шлаковых расплавов возможно отливать или экструзивно формовать различные изделия: закристаллизованную брусчатку, плиты для мощения улиц и тротуаров, бордюрные камни др. Из них же получают пористые заполнители (шлаковую пемзу), а путем управляемой кристаллизации ценные материалы – шлакоситаллы. Например, ситаллы – стеклокристаллические материалы или синтетические камни, отличающиеся от природных тонкозернистой равномерной микроструктурой, способствующей созданию материалов высокой стойкости и прочности. То есть, регулируя составы только расплавов возможно, получать синтетические материалы с заданным комплексом физических и химических свойств. Поскольку технология шлакоситалловподобна технологии производства изделий из стекла, то для их производства пригодно оборудование стекольной промышленности. Кроме того из этих материалов изготавливают плиты для отделки стен и пола, панели для совмещенных кровель, навесные и самонесущие панели наружных стен, санитарно-техническое оборудование, трубы – для газификации, теплофикации, для химической промышленности и сельского хозяйства; столбы, ограды, долговечные скульптуры.

Вспученный шлакоситалл-пеношлакоситалл – хороший и дешевый теплоизоляционный материал. Сочетая шлаковую пемзу (термозит) с расплавами, отливают крупные блоки и изделия (шлаколит).

Весьма перспективно применение шлаковых расплавов для изготовления

различных профилированных изделий взамен изделий из специально расплавляемых базальтов.

Из неполного перечня шлаковых материалов следует, что металлургические шлаки действительно особо ценный вид сырья.

Другие отходы: *золы и топливные (котельные) шлаки* образуются от сжигания сотен миллионов тонн каменных углей, горючих сланцев и торфа, насыщающая атмосферу кислотными продуктами. Только от сжигания 1 т угля, получается от 100 до 250 кг топливных отходов. Хотя многие отрасли промышленности переходят на природные газы, а также на газ, получаемый газификацией различных углей. Но и после газификации от 1 т угля остается от 0,2 до 0,4 м³ шлаков и золы.

Все это требует огромных площадей для захоронения.

Вместе с тем топливные отходы (шлаки и золы) являются хорошим сырьем для изготовления многих строительных материалов. Например, некоторые золы от сжигания горючих сланцев представляют собой вяжущие вещества, другие золы и шлаки используются для получения легких бетонов (шлакобетонов, золобетонов, особо легких «ячеистых» бетонов – газобетонов и пенобетонов).

Отходы «пустых» пород, извлекаемых из угольных шахт и состоящих из угольно-глинистых сланцев с содержанием в количестве 10...15% угля и сернистых примесей образуют от самовозгорания (с повышением температуры до 800...1000 °С) – «горелые породы» – терриконы. Терриконы долгое время дыматься, преобразуясь из пустых пород в своеобразные шлаки, которые применяются подобно топливным отходам. Но чаще всего это обожженные и вспучившиеся глины, из которых дроблением возможно получать аглопорит.

Другой вид – *органические отходы* и в частности – древесные отходы. В нашей стране ежегодно вырубается примерно 1/3 годового прироста древесины – это порядка нескольких сот миллионов кубических метров. При этом из каждых 5 м³ срубленной древесины из леса вывозится около 4 м³ бревен, а после их распиловки получается менее 3 м³ пиломатериалов, остальное составляют отходы (долготье, коротье, горбыли, рейки, стружки, опилки). Выход пило-

материалов с учетом усушки в среднем составляет 55...60% объема бревна. Общее количество древесных отходов ежегодно составляет более 150 млн м³. Из них в виде горбыля и реек – до 25%, а опилок – 10%. Еще часть расходуют как топливо, остальное не используется.

Если превратить эти отходы в стружку или целлюлозные волокна и смешать с синтетическими смолами, то могут быть получены древесно-стружечные или древесно-волокнистые плиты и ценная добавка в бетоны в виде фибры.

Отходы сельского производства – костру (паклю) лубяных растений (льна, конопли и др.), солому и др. можно использовать для получения теплоизоляционных и звукоизоляционных плит, листов и плит для отделочных работ (полов, стен).

Сегодня **огромной промышленностью строительных материалов является железобетон**, для которого не хватает уже природных компонентов – кварцевого песка и гранитного щебня.

Наступивший XXI век должен быть веком инновационных бетонов на основе техногенных отходов, позволяющим решить экологические, энергетические и природоохранные задачи главное поднять технологию бетонов на новую эколого-экономическую ступень развития [1].

Бетонведение рассматривается с точки зрения решения экологических проблем открывает следующие направления:

сокращение выбросов веществ, сопутствующих производству портландцемента, и энергозатрат;

сокращение расхода клинкерного цемента на 1 м³ бетона без ухудшения его качества;

замена клинкерной части цемента, а также природных заполнителей, техногенными отходами других производств, в том числе содержащих токсичные элементы, благодаря консервации превращению их в нерастворимые вещества.

Сегодня отходы являются основой новой химизации бетона с достижением у него новых технических показателей. Так золы, шлаки и золошлаковые смеси, применяемые лишь для замены части цемента, улучшают удобоукладываемость смесей, обеспечивают требуемую прочность и морозостойкость бетона до:

$F = 100...300$,

снижают усадку и водопроницаемость. Зола повышает коррозионную стойкость железобетона и сульфатостойкость обычного бетона, не влияя на его деформации ползучести, усадку и модуль упругости.

Приготовленную *золошлаковую смесь* (2) и шлак применяют взамен тяжелых заполнителей природного происхождения (песка, гравия и щебня), легких (пористых) заполнителей искусственного изготовления (керамзит, аглопорит и др.), природного происхождения (пемза, туф и др.) или в сочетании с ними.

Плотный шлак отдельного удаления с последующим охлаждением расплава водой применим для обогащения мелких природных песков или в качестве щебня мелкой фракции для тяжелых бетонов.

Пористый шлак твердого удаления может служить крупным заполнителем в легких бетонах.

В настоящее время классификация и показатели свойств отходов вошли в нормативные документы. Так в соответствии с ГОСТ 25818 по виду сжигаемого топлива золы-уноса (золы сухого отбора) подразделяют на антрацитовые (А), каменноугольные (КУ) и бурогоугольные, образующиеся в результате сжигания бурого угля (Б).

Золы уноса (ЗУ) ТЭС применяют и в качестве компонента для изготовления тяжелых, легких, ячеистых бетонов и строительных растворов, а также в качестве тонкомолотой добавки для жаростойких бетонов. И в зависимости от области применения подразделяют на 4 вида: I – для железобетонных конструкций из тяжелого и легкого бетонов; II – для бетонных конструкций и изделий из тяжелого и легкого бетонов, строительных растворов; III – для изделий и конструкций из ячеистых бетонов; IV – для бетонных и железобетонных изделий и конструкций, работающих в особо тяжелых условиях (гидротехнические сооружения, дороги, аэродромы и др.).

По химическому составу золы-уноса делятся на 2 типа: кислые (К), содержащие окись кальция (CaO) до 10% по массе и основные (О), содержащие CaO более 10% по массе, в т.ч. у ЗУ топлива Б свободного CaO_{св} – не более 5% для I и II вида золы и не более 3% –

для IV вида. Для III вида $\text{CaO}_{\text{св}}$ не нормируется.

В обозначениях марок золы учитываются вышеизложенные сокращения.

Пример: ЗУ КУК-1 ГОСТ 25818 – каменноугольная (КУ), кислая (К), зола уноса (ЗУ) для изготовления железобетонных конструкций должна соответствовать следующим требованиям:

содержание оксида магния (MgO) – не более 5% для I, II и IV видов; для III вида – не нормируется;

содержание сернистых и сернокислых соединений в пересчете на SO_3 для кислых ЗУ I, III и IV вида – не более 3% и II – 5%, для основных (О) ЗУ I и II вида – не более 6%, III – 6% и IV – 3%;

содержание щелочных оксидов в пересчете на Na_2O для ЗУ кислых I–IV видов не более 3%, основных I, II и IV видов – не более 1,5% и III – 3,5%; P_{III} для ЗУ кислых из КУ: I вида – не более 10%, II – 15%, III – 7% и IV – 5%; из А: I вида – не более 20%, II – 25%, III и IV – 10%; из Б: I вида – не более 3%, II – 5%, III – 5% и IV – 2%; для ЗУ основных из Б: I, III и IV видов – не более 3% и II – 5%.

Удельная поверхность зол ($\text{м}^2/\text{кг}$) должна составлять для ЗУ кислых I и III вида не более 250, для ЗУ кислых II вида – 150 и для ЗУ кислых IV ви-

да – 300; для ЗУ основных I вида – 250, ЗУ основных II вида – 200, ЗУ основных III вида – 150 и ЗУ основных IV вида – 300. Остаток на сите № 008 (% по массе) должен составлять для ЗУ К I и I II видов – не более 20%, ЗУ К II вида – не более 30% и ЗУ К IV вида – не более 15%; для ЗУ О I и II видов – не более 20%, I II вида – не более 30% и IV вида – не более 15%.

К сожалению, в России из (50 млн т) общего объема образующихся золошлаковых отходов лишь не более 11% приходится на долю золы уноса.

Однако мировой практикой золо-теплоэлектростанций ТЭС – эффективный компонент бетонов повышенных количествах (50...200 кг/м³) (а для высокопрочных бетонов – микрокремнезем или его комбинация с золой) вводится в подавляющее большинство бетонов и рассматривается как обязательный компонент.

Зола вводимая в больших количествах, требует сокращения на ту же величину тех или иных компонентов бетона. Введение золы в бетонную смесь возможно взамен цемента или взамен песка. Эти способы взаимосвязаны (табл. 1).

Таблица 1

№ состава	Расход материалов, кг/м ³					Rсж, МПа
	вода	цемент	песок	щебень	зола	
1	190	330	650	1200	–	25
2	200	230	590	1200	100	18,7
3	190	230	730	1200	–	13,6
4	200	229	531	1200	100	25

Бетон с расходом золы 100 кг/м³ бетона (состав 2) может быть получен ее введением по объему как взамен цемента в состав 1 с расходом цемента 330 кг/м³, так и взамен песка в состав 3 с расходом цемента 230 кг/м³.

Изменения объемов вследствие повышения водопотребности смеси с золой и меньшей плотности золы ($\rho_z = 2,1 \text{ г/см}^3$) компенсируются повышением расхода песка. При этом введение золы взамен цемента может приводить к снижению прочности. Более эффективно введение золы взамен песка: если зола эффективна – прочность растет (в составе 4 на 14%). На практике, как

правило, обычно требуется сохранить прочность на постоянном уровне. Для чего частями золы заменяют цемент и песок.

Пропорции замены зависят от эффективности золы, качество которой количественно выражается коэффициентом эффективности (Кэ). Физический смысл его представляет – отношение масс сокращаемого цемента и вводимой золы, при сохранении постоянной прочности бетона. При использовании Кэ становится наглядным назначение состава бетона с золой. Так, Кэ = 0,5 означает, что при введении в бетон, например, 100 кг золы для сохранения прочности расход цемента возможно

сократить на 50 кг и еще на 50 кг – расход песка (при замене по массе). Если вводить золу в состав 1 (табл. 2) с целью

получения равнопрочного бетона, то, приняв $K_э = 0,31$, получим состав 4 (замена по объему).

Таблица 2

Коэффициент эффективности некоторых зол

Расход цемента, кг/м ³	Вид золы/условия твердения			
	Ангарской ТЭС	Буштырской ТЭС		Углегорской ТЭС
	пропаривание	нормальное твдение	пропаривание	пропаривание
240	0,39	0,46	0,5	0,39
300	0,31	0,36	0,4	0,42
350	0,2	0,79	0,33	0,45
400	-	0,2	0,25	0,5

Иногда более полезной оказывается «прочностная» интерпретация $K_э$: отношение прироста прочностей при введении какого-либо количества золы и того же количества цемента. В этом случае $K_э$ определяется проще. Так как прочностной эффект увеличения расхода цемента на каждом производстве известен, то остается установить прочностной эффект от введения золы (взамен песка). В качестве примера можно воспользоваться данными табл. 1. Прочностной эффект от 100 кг цемента – 11,4 МПа, а от 100 кг золы – 5,1 МПа, откуда:

$$K_э = \frac{5,1}{11,4} = 0,45.$$

При использовании $K_э$ имеются и сложности, связанные с зависимостью его величины от расхода цемента, количества золы, режима твердения (приведенные выше значения $K_э$ справедливы для определенного расхода цемента).

Большинство российских зол имеет повышенную водопотребность, поэтому $K_э$ понижается с ростом расхода цемента, а для зол низкой водопотребности, пластифицирующих бетонную смесь, он может и повышаться. Вообще данные о зависимости $K_э$ от расхода цемента несколько противоречивы, поэтому его лучше определять экспериментально.

С ростом расхода золы эффективность ее снижается и установление рассматриваемой зависимости становится трудоемким. Тогда возможно ограничиться одним расходом золы (например, 100...150 кг/м³), а больший $K_э$ при меньших расходах золы рассматривать как

некоторый коэффициент запаса прочности. Такие составы могут быть в дальнейшем

скорректированы по результатам производственного контроля прочности бетона.

Основным видом золы, вводимой в бетоны, является низкокальциевая зола ТЭС сухого удаления. Она представляет собой преимущественно силикатное стекло, а слагающий его аморфный кремнезем химически активен по отношению к $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющемуся при гидратации цемента (так называемая - пуццоланическая активность). Реакция между ними приводит к образованию высокодисперсных гидросиликатов кальция (типа $\text{CaOSiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) с высокой вяжущей способностью взамен малопрочного- $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а измельчение частиц – к уменьшению размеров пор и снижению проницаемости. Все это улучшает структуру бетона. К сожалению, пуццолановая реакция (с аморфным кремнеземом) начинается поздно (примерно в 7-суточном возрасте) и протекает медленно; основной ее эффект при нормальном твердении бетона проявляется к 3-месячному возрасту и интенсивное твердение бетона с золой наблюдается в более позднем возрасте – до года и более. В итоге прочностной эффект от введения золы и экономии цемента, определенные по 28-суточной прочности, оказываются ниже, чем для бетона большего возраста. Тем не менее этот «возрастной» эффект не теряется, а обусловит и дополнительный запас прочности, и пониженную проницаемость, а следовательно, повышенную долговечность такого

бетона (разумеется, при условиях, способствующих продолжению гидратации в позднем возрасте).

Кроме пуццоланического эффекта, зола оказывает на бетон и значительное физическое воздействие, которое принято называть «эффектом микронаполнителя». В чистом виде он проявляется в повышении прочности при введении в бетон инертных порошков, например, молотого песка, пылевидных отходов дробления и т.д. Его основой можно считать увеличение концентрации дисперсных частиц в цементном тесте-камне, что вызывает снижение его пористости. Другой аспект этого эффекта проявляется в бетонных смесях с низким расходом цемента, где имеет место явный дефицит дисперсных частиц. Введение золы его ослабляет или ликвидирует, в итоге улучшается зерновой состав цементно-песчаной составляющей, уменьшается расслоение бетонной смеси и повышается однородность бетона. Следует отметить, что «стабилизирующая» роль золы возрастает в связи с тенденцией применения в монолитом строительстве высокоподвижных смесей, с повышенной склонностью к расслоению.

При увеличении расхода цемента расслоение бетонной смеси снижается, но повышается тепловыделение твердеющего бетона, что может привести к образованию микротрещин уже на ранних стадиях твердения. Сокращение расхода цемента при введении золы снижает тепловыделение и вероятность образования термических микротрещин, что также улучшает структуру бетона. В массивном бетоне опасность микротрещин существенно возрастает, и положительная роль золы проявляется во всем диапазоне расходов цемента.

Введение золы улучшает целый комплекс свойств бетонной смеси и бетона. Следует отметить, что это происходит одновременно со снижением расхода цемента в бетонах с золой в соответствии с Кэ. Бетонная смесь с золой при той же подвижности более пластична, легче перекачивается и заполняет формуемое пространство, что особенно важно при «трудных» условиях укладки. Затвердевший бетон с золой, имея пониженную проницаемость, повышает долговечность, защитное действие по отношению к арматуре затрудняя диф-

фузию ионов хлора в бетон, а также коррозионную стойкость. Особенно резко повышается сульфатостойкость.

Но эти эффекты достигаются при продолжительном влажностном уходе, что обеспечивает пуццолановую реакцию в поверхностном слое бетона, который ответственен за перечисленные свойства.

В то же время следует учитывать и некоторые негативные последствия введения золы в бетон. Прежде всего, замедляется твердение бетона в ранние сроки, особенно при пониженных температурах. В ряде случаев, особенно при значительных расходах золы, возможно снижение морозостойкости бетона, что является сложной функцией расхода золы, длительности ухода за бетоном и возраста, в котором начинается воздействие мороза. Наконец, следует учитывать, что взаимодействие золы с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при пуццолановой реакции ведет к уменьшению щелочного резерва в бетоне, при больших расходах золы может возникнуть опасность его полного связывания и коррозии арматуры. Поэтому количество вводимой золы ограничивается.

ГОСТ 25818-91 предусматривает максимально допустимое отношение золы : цемент как 1:1 по массе.

Шлаки ТЭС, запасы которых исчисляются миллионами тонн, являются прекрасным сырьем для производства бетона. Они образуются из минеральной части углей, сжигаемых в пылевидном состоянии в топках котлоагрегатов.

Многие районы страны испытывают острый недостаток – природных песков, отвечающих требованиям действующих стандартов, поэтому строители вынуждены использовать очень мелкие пески с $M_{кр} = 1, \dots, 1,2$. Это неизбежно ведет к перерасходу цемента и снижению качества железобетонных конструкций. В последнее время мелкие природные пески обогащают попутными продуктами и отходами производства. Рациональное использование отходов расширяет сырьевую базу строительства и снижает его стоимость.

Шлаки по зерновому составу представляют собой механическую смесь шлакового песка (крупность зерен 0,14...5 мм) и шлакового щебня (крупность зерен более 5 мм). Плотность зерен шлака, образующихся в топках котлов, агрегатов с жидким

шлакоудаленном, находится в основном в пределах 2,3...2,5 т/м³; дробимость зерен фракции 5...10 мм по методике ГОСТ 8269 составляет 20...25%, а прочность образцов-кубов с ребром 2см, выпиленных из куска шлака, достигает 150...200 МПа. То есть шлаки ТЭС применимы в качестве заполнителей бетонов высоких марок, вплоть до М700.

Учитывая высокое значение модуля крупности (Мкр) шлакового песка (3,05...3,96), топливный шлак разделять в качестве компонента, улучшающего гранулометрию мелких песков.

Шлаковый песок не имеет недостатков, присущих многим видам промышленных отходов – практически не содержит лещадных и игловатых зерен, илистых, глинистых и других вредных примесей. Некоторое количество пылевидных фракций, которое может содержаться в шлаках, не ухудшая свойств бетона, заметно улучшает реологические характеристики бетонной смеси.

Практика показала, что стабильная однородность и прочность бетона могут быть получены лишь при оптимальном дозировании, учитывающем гранулометрию исходного песка и добавляемого шлака. Методика расчета состава бетона, обеспечивающего получение оптимальной гранулометрии заполнителей и повышение плотности и прочности бетона, учитывает, что в составе топливного шлака содержатся не только песчаные фракции, но и более крупные зерна, заменяющие щебень. Кроме того, плотность зерен шлака ниже, чем традиционных заполнителей из твердых горных пород, поэтому, количество шлакового заполнителя должно быть меньше суммы масс кварцевого песка и гранитного щебня.

Структуры цементного камня с отходом кремнезема с микро- и наноразмерными частицами.

Сегодня широкое внимание технологов привлекает экологически весьма нежелательные отходы черной, цветной металлургии в виде силикатного «дыма», имеющих в своем фракционном составе даже наноразмерные частицы. Их захоронение требует по-

мимо технологических операций подготовки и складирования еще и закрытия поверхности гумусом с газоном для того, чтобы предотвратить дальнейшее пыление отходов в сухую или жаркую погоду.

При микро- и наноразмерных наполнителях цементного камня актуальны явления и механизмы, участвующие в структурообразовании от их введения как модификатора. Роль микро- и нано-размерных частиц в процессах модифицирования структуры цементного камня и бетона рассматривается в контексте с влиянием включений других их размерных масштабов.

В технологическом материаловедении каждый размерный масштаб «включения» частиц соотносится с соответствующим своим масштабным уровнем структуры, представляемым в виде двухкомпонентной подсистемы «матрица - включение». Это последовательно касается крупного, мелкого заполнителя, микрозаполнителя, ультрамикро- и наноразмерных частиц. Каждый вид включения, «работая» в рамках своего масштабного уровня структуры, влияет на структуру всего материала (как композита). Последним, и это важно, предопределяется синергизм получаемых эффектов.

Необходимость системной количественной сбалансированности содержания включений разного размерного масштаба очевидна. Эта задача имеет отношение и к оптимизации дозировки микро- и наномодифицирующих частиц.

Размерный масштаб следует рассматривать в качестве исходного идентификационного параметра включений. С размерно-геометрическим и визуальным экспресс-фиксируемым признаком, связаны многие идентификационные характеристики включений – удельная площадь поверхности, удельная поверхностная энергия, число частиц и число контактов частиц в единице их объема (см. таблицу 3), квантово-размерные эффекты и состояния частиц, предопределяющие проявление ими механических, физических и химических воздействий на процессы структурообразования и эффекты преобразования структуры материалов.

Оценочные характеристики включений, вводимых в структуру бетона

Наименование включения	Размер, м	Удельная поверхность, м ² /кг	Удельная поверхностная энергия, Дж/кг	Число частиц в единице объема (в 1 м ³)	Число контактов частиц в единице объема (в 1 м ³)
Крупный заполнитель	$5 \cdot 10^{-3} \dots 4 \cdot 10^{-2}$	До 0,5	До 0,6	До $1 \cdot 10^4$	До $9 \cdot 10^4$
Мелкий заполнитель	$5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-3}$	До 24	До 30	До $5 \cdot 10^6$	До $4 \cdot 10^7$
Микрозаполнитель	$5 \cdot 10^{-6} \dots 2 \cdot 10^{-4}$	До 300	До 400	До $1 \cdot 10^{12}$	До $9 \cdot 10^{12}$
Микрокрем-незем	$1 \cdot 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-7}$	До 20 000	До 18 000	До $6 \cdot 10^{18}$	До $4 \cdot 10^{19}$
Наноразмерные частицы	$2 \cdot 10^{-9} \dots 4 \cdot 10^{-8}$	До 200 000	До 250 000	До $2 \cdot 10^{22}$	До $1 \cdot 10^{23}$

Рассматривая возможные механизмы участия микро- и наноразмерных частиц в процессах структурообразования цементного камня и бетона, необходимо рассмотреть систему, в которой оказываются они изначально.

Это полидисперсные многофазные системы цементного теста со сложением исходных дисперсных частиц в упаковке определенной плотности. В них развиваются процессы смачивания, адсорбции, хемосорбции, пептизации, растворения, гидратации, коллоидации, зародышеобразования и фазообразования с кристаллизацией и перекристаллизацией.

«Жизненный цикл» микро- и наноразмерных частиц определяется сущностью и мерой вовлечения их в эти явления и процессы структурообразования. Это зависит от размерногеометрических и субстанциональных характеристик, дозировки микро- и наноразмерных частиц. В общем случае структурообразующее участие и преобразующее их влияние становится результатом следующих взаимосвязанных механизмов.

Первым и общеизвестным является механизм, определяющий повышение плотности упаковки системы сложения дисперсных частиц, уменьшение общей ее пористости, изменение структуры пористости.

На стадии развития процессов смачивания, адсорбции, хемосорбции присутствующие в системе микро- и наноразмерные частицы способны за счет увеличения объема адсорбционно и хемосорбционно связываемой ими воды уменьшать объем капиллярно-связанной и свободной воды, приводить вследствие

этого к изменению технологических реологических свойств цементного теста и бетонной смеси, к повышению их вязкости и пластической прочности.

На стадии коллоидации, зародышеобразования и фазообразования микро- и наноразмерные частицы способны выполнять роль центров кристаллизации и понижать энергетический порог этого процесса, ускорять его.

Одновременно проявляющимся эффектом влияния частиц как центров кристаллизации будет «зонирование» структуры твердения. Микрообъемы структуры твердения будут оказываться в поле энергетического, термодинамического влияния отдельных микро- и наночастиц, что будет сопровождаться формированием агломератов и кристаллитов из новых гидратных фаз. Размер, объем, число агломератов и кристаллитов в единице объема будет предопределяться квантоворазмерным состоянием частиц, количественным их содержанием (дозировкой) в единице объема цементного камня и бетона.

Зонирование – как процесс и как результат процесса преобразования структуры цементного камня обеспечивает положительные явления для свойств бетона, поскольку имеет прямое отношение к характеристикам однородности-неоднородности структуры, площади границ раздела фаз и соответственно к изменению условий работы материала под нагрузкой с точки зрения концентрации и локализации, формирования в нем напряжений и деформаций, условий зарождения и продвижения трещин.

Еще один принципиально важный механизм модифицирования структуры

цементного камня при введении микро- и наноразмерных частиц связан с возможностью их непосредственного химического участия в гетерогенных процессах фазообразования гидратных соединений. Такая возможность определяется как субстанциональным признаком (химико-минералогическим составом) частиц, так и повышенными значениями удельной площади их поверхности и удельной поверхностной энергией.

Таким образом, характеризуя механизмы преобразующего влияния микро- и наноразмерных частиц на структурообразование и структуру цементного камня и бетона, следует в общем случае иметь в виду пространственно-геометрический аспект (параметры системы сложения дисперсных частиц, плотность их упаковки, пористость и структура пористости, зонирование образования новой фазы), термодинамический и кинетический аспект (энергетическое облегчение процессов гидратации и твердения, их ускорение), кристалло-химический аспект (проявление частицами роли кристаллической затравки, фактор зонирования аморфно-кристаллической структуры, участие субстанции частиц в химико-минералогических процессах фазообразования), наконец, технологический аспект (влияние на водопотребность, изменение реологических характеристик формовочных смесей).

Однако возможности и мера реализации этих механизмов структурообразования цементного камня должны определяться видом, характеристиками и дозировкой микро- и наноразмерных частиц.

В этом ряду одним из самых приемлемых вариантов является использование наноразмерных частиц кремнезема по причине их доступности, возможности относительно простого и недорогого синтеза.

При общности рассмотренных механизмов преобразования структуры цементного камня микро- и наноразмерными частицами кремнезема существует принципиальная разница в эффективности их применения. Это обусловлено прежде всего значительным отличием размеров микро- и наноразмерных частиц кремнезема при том, что по своей субстанциональной природе микро- и наноразмерные частицы кремнезема являются подобными.

Применяемый сегодня в практике микрокремнезем (МК) является побочным продуктом производства кремния и ферросплавов, состоящим на 80...98% из диоксида кремния аморфной модификации; частицы имеют сферическую форму со средним диаметром 200 нм; удельная площадь поверхности, измеренная методом адсорбции азота, составляет 15 000...25 000 м²/кг; удельная поверхностная энергия может достигать 18 кДж/кг, а число частиц в единице объема – 10¹⁸ шт./м³.

Габариты наноразмерных частиц кремнезема на два порядка меньше размеров частиц микрокремнезема и составляют от 1 до 20 нм; удельная площадь поверхности наноразмерных частиц SiO₂ может достигать 200000 м²/кг, а удельная поверхностная энергия – до 250 кДж/кг. Это создает ситуацию, когда большинство связей атомов наночастиц выходит на поверхность, тем самым, обеспечивая чрезвычайно высокую удельную поверхностную энергию, отнесенную к массе частиц. Объем улавливания микрокремнезема в России составляет 30...40 тыс. т. Это ценнейший супер пупцолоновый отход, применяемый для производства супервысокопрочных бетонов.

Заключение

Рентгенометрическое исследование кинетики процесса структурообразования цементного камня, модифицированного наноразмерными частицами SiO₂, выявило следующие закономерности: процесс протекает значительно быстрее, так как уже при длительности твердения 1 час присутствует значительное количество гидросиликатных фаз; процесс фазообразования характерен тем, что доминирующей фазой в данном случае являются более низкоосновные гидросиликаты кальция. С увеличением продолжительности твердения содержание данной фазы увеличивается, при этом уменьшается количество фаз 3CaO·SiO₂, и более активно происходит увеличение содержания фаз 2CaO·SiO₂·nH₂O и (CaO)_x·SiO₂·nH₂O. И это связано именно с введением в цементно-водную систему наноразмерных частиц SiO₂. Существенным отличием применения наноразмерных частиц является то, что их присутствие в системе наблюдается лишь в начальные сроки твердения (8–24 часа); затем они не фиксируются. Это обусловлено их чрезвычайно высокой химической активностью и способностью

участвовать в реакциях, вероятно, и по топохимическому механизму.

Высокая удельная поверхностная энергия частиц микрокремнезема и, особенно наночастиц SiO₂, изменяет термодинамические условия химических реакций и приводит к появлению продуктов твердения измененного, по сравнению с системой твердения без добавки, минералогического, морфологического и дисперсного составов.

К середине 20-ого века в результате сравнительных испытаний, было установлено, что в отличие от цементного бетона бетон на основе серы (серный) отхода нефте- и газопереработки обладает особенными свойствами, такими, как низкое водопоглощение, высокая водонепроницаемость, быстрая кинетика набора и сохранения высокой прочности, высокая коррозионная стойкость [2].

Добавление к серному вяжущему пластификаторов (в частности полисульфидов) способствует не только повышению пластичных характеристик раствора, но и уменьшению трещин, а добавка в виде дициклопентадина повышает жаростойкость.

Библиографический список

1. Гусев Б.В. и др. Использование твердых отходов литейного производства в строительной индустрии // Экология и промышленность России. – 2005. – № 2. – С. 12–15.
2. Усов Б.А., Волгушев А. Н. Технология модифицированных серных бетонов. – М., изд-во МГОУ, 2010.
3. Усов Б.А., Окольникова Г.Э., Акимов С.Ю. Экология и производство строительных материалов // Системные технологии. – 2015. – №4. – С. 84–105.

Сведения об авторах

Усов Борис Александрович, кандидат технических наук, Акционерное общество «Ассоциация композитных строительных материалов», г. Москва.

Окольникова Галина Эриковна, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образова-

ния «Российский университет дружбы народов», г. Москва.

Акимов Сергей Юрьевич, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва.

References

1. Gusev B.V. i dr. Ispol'zovanie tverdyh othodov litejnogo proizvodstva v stroitel'noj industrii // Jekologija i promyshlennost' Rossii. – 2005. – № 2. – С. 12–15.
2. Usov B.A., Volgushev A. N. Tehnologija modifitsirovannyh sernyh betonov. – М., izd-vo MGOU, 2010.
3. Usov B.A., Okol'nikova G.E., Akimov S.Yu. Jekologija i proizvodstvo stroitel'nyh materialov // Sistemnye tehnologii. – 2015. – №4. – С. 84–105.

Information about the authors

Usov Boris Aleksandrovich, candidate of technical sciences, Public company «Associaciya kompozitnykh stroitelnykh materialov», Moscow, Russia.

Okolnikova Galina Erikovna, candidate of technical sciences, Russian University of Friendship of People, Moscow, Russia.

Akimov Sergey Yurievich, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia.

Для цитирования: Усов Б.А., Окольникова Г.Э., Акимов С.Ю. К вопросу состояния инновационных направлений развития производства строительных материалов Из отходов промышленности // Экология и строительство. – 2017. – № 1. – С. 14–25.

For citations: Usov B.A., Okolnikova G.E., Akimov S.Yu. To the question of innovative directions of development of manufacture of building materials from industrial waste // Ekologiya & Stroitelstvo. – 2017. – № 1. – P. 14–25.