

ВЛИЯНИЕ ТОНКОДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР)

К.т.н. Ильдар Каримов

Адрес для контакта: 450071, Россия, г.Уфа, а/я 21, Башкирский государственный аграрный университет, Кафедра теоретической и прикладной механики, Телефон/факс: (3472) 30-81-38, E-mail: dh@ufacom.ru

Данный литературный обзор освещает современные представления о влиянии тонкодисперсных минеральных наполнителей (ТМН) на прочность цементных бетонов.

Изучению влияния ТМН на структуру и свойства цементного камня и бетона посвящено большое число работ в нашей стране и за рубежом. Сегодня общепризнано, что введение минеральных наполнителей в качестве самостоятельной составляющей бетонных и растворных смесей является одним из существенных резервов повышения экономичности цементных композиций по стоимости и расходу цемента и улучшения их строительно-технологических свойств.

Однако, среди ученых нет единого мнения по механизму влияния минеральных наполнителей высокой дисперсности на структуру и свойства цементного камня и цементных бетонов. В частности, в последнее время активно дискутируется вопрос о природе так называемого “эффекта микронаполнителя”, который выражается в повышении прочности при введении в бетон инертных ТМН, а также может являться частью эффекта гидравлически активных наполнителей.

Согласно Высоцкому С.А. [7] к минеральным наполнителям для бетонов, а также для вяжущих материалов относятся природные и техногенные вещества в дисперсном состоянии, преимущественно неорганического состава, не растворимые в воде (основное отличие от химических добавок) и характеризующиеся крупностью зерен менее 0,16 мм (основное отличие от заполнителей).

Обычно в качестве наполнителей используют побочные продукты различных производств. К таким производствам, где объем побочных продуктов достигает миллионов тонн в год, относятся тепловые электростанции, использующие в качестве топлива уголь или рисовую шелуху, а также металлургические печи, выпускающие чугун, сталь, ферросилиций и ферросплавы.

Рассмотрим факторы, которые считаются основными при оценке влияния ТМН на свойства цементного камня и бетона и, в частности, на прочность. Они связаны, как пишет В.С.Рамачандран [14], либо с физическим эффектом, который проявляется в том, что мелкие частицы обычно имеют более тонкий гранулометрический состав, чем портландцемент, либо с реакциями активных гидравлических составляющих.

Как уже было сказано, существуют несколько точек зрения о природе “эффекта микронаполнителя”.

Согласно одной из них, микронаполняющий эффект проявляется при увеличении объемной концентрации тонкодисперсного наполнителя, приводящее к снижению пористости цементного камня в бетоне.

Введение наполнителей в бетонные смеси производится двумя принципиально различными способами: наполнитель вводится по объему взамен части цемента (содержание дисперсных частиц в смеси на меняется) и взамен части мелкого заполнителя - кварцевого песка (вся вводимая добавка идет на увеличение содержания дисперсных частиц в смеси). Имеются также промежуточные варианты, когда добавка частично заменяет цемент, а частично песок. При этом пуццолановая активность проявляется при любых способах введения добавок, микронаполняющий эффект, лишь при росте содержания дисперсных частиц в смеси, считает А.Г.Зоткин [9].

Но при высокой степени наполнения после достижения его максимума происходит уменьшение прочности бетонов несмотря на продолжающееся снижение пористости цементного камня, вследствие, по [9], ухудшения сцепления наполненного цементного камня с заполнителем.

В.К.Власов [6] считает однако, что увеличение количества наполнителя выше оптимального приводит к разбавлению цементного камня наполнителем, к нарушению непосредственных контактов между гранулами клинкера и уменьшению прочности. При оптимальном количестве минерального наполнителя в бетоне структура цементного камня характеризуется оптимальным насыщением цемента наполнителем. Наглядным критерием этого состояния является достижение максимально плотной упаковки частиц в тесте, если частицы наполнителя значительно мельче частиц цемента, или достижение максимального насыщения цемента наполнителем без образования контактов частиц наполнителя между собой, если частицы наполнителя и цемента соизмеримы.

Такого же мнения придерживается С.С.Каприелов [12], который пишет, что в смешанной системе цемента с ультрадисперсным материалом важно, чтобы частицы ультрадисперсного материала не обволакивали поверхность новых фаз и не препятствовали образованию контактов срастания между кристаллогидратами. Это условие, пишет он далее, может быть соблюдено при оптимизации объемной концентрации ультрадисперсного материала в смешанной системе с учетом гидравлической активности микронаполнителя. Для инертного микронаполнителя оптимальной дозировкой может быть объем, сопоставимый с объемом капиллярных пор и необходимый для заполнения соответствующих пустот, а также уплотнения структуры.

Эффект заполнения пустот является физическим фактором и наблюдается независимо от гидравлической активности ультрадисперсного материала. Однако увеличение дозировки сверх объема указанных пор в зависимости от гидравлической активности может привести к противоположным результатам. Приведенные С.С.Каприеловым [12] экспериментальные данные показывают, что при повышенном объемном содержании инертного микронаполнителя эффект заполнения пустот и уплотнения структуры не может компенсировать негативного воздействия микронаполнителя на контакты срастания, поэтому прочность снижается.

Существует также мнение [21, 22, 26], что в основе "эффекта микронаполнителя" лежит свойство частиц тонкодисперсных наполнителей выполнять роль центров кристаллизации, т.е. ускорять начальную стадию химического твердения.

Так, исследования проведенные Ж.А.Ларби и Ж.М. Бижен [21] на цементном тесте с добавкой 20% кремнеземистой пыли (19300 см²/г, 95% SiO₂) показали, что кремнеземистая пыль - побочный продукт производства ферросилиция ускоряет гидратацию портландцемента и

шлакопортландцемента уже в первые часы после затворения, когда кремнеземистая пыль является химически инертным наполнителем. На высокодисперсных субмикроскопических частицах кремнеземистой пыли происходит осаждение продуктов гидратации, причем эти частицы служат центрами нуклеации и кристаллизации. Через 1 сут гидратационного процесса на поверхности частиц происходит хемосорбция OH^- , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ из жидкой фазы, что препятствует образованию кристаллизации этtringита, а через 3 сут начинается пуццолановая реакция.

Этими же авторами в работе [22] проводились исследования цементного теста с добавлением высокодисперсного песка. Установлено, что при повышении дисперсности песка и росте его содержания в композиции скорость выделения $\text{Ca}(\text{OH})_2$ повышается. Это объяснено тем, что частицы песка служат подложкой для кристаллизации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ из поровой жидкости. При росте водосодержания композиций перемещение ионов Ca^{2+} и OH^- к поверхности частиц песка облегчается, что приводит к интенсификации процесса образования и роста кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Явление повышения прочности вяжущих при введении в их состав микронаполнителей, И.М.Красный [11], помимо гидравлической активности, также объясняет образованием наиболее мелкими зернами микронаполнителя (коллоидных размеров) центров кристаллизации в контактной зоне цемента. В отличие от авторов указанных выше публикаций, исследовавших главным образом образцы цементного камня, им проведены экспериментальные исследования прочностных свойств бетонов на вяжущих, включающих тонкодисперсные компоненты - золу Ступинской ТЭЦ с удельной поверхностью $3440 \text{ см}^2/\text{г}$ и содержанием 1,8% CaO ; золу Новосибирской ТЭЦ с удельной поверхностью $4800 \text{ см}^2/\text{г}$ и содержанием 26,8% CaO ; диатомит Уренгойского месторождения и молотый речной песок с удельной поверхностью около $4000 \text{ см}^2/\text{г}$.

Обнаружено, что при введении молотого песка и золы Ступинской ТЭЦ в мелкозернистые и обычные тяжелые бетоны в оптимальном количестве, их прочность увеличивается в 1,4...1,8 раза (при постоянном водоцементном отношении). А при введении в бетоны золы Новосибирской ТЭЦ и диатомита, их прочность возрастает в 1,9...2,6 раза даже при одновременном значительном увеличении водоцементного отношения. Хотя проведенные им опыты свидетельствуют о том, что смесь извести с молотым речным песком состава 1:3 в нормальных условиях не твердеет, а с золой Ступинской ТЭЦ - обладает незначительной прочностью (1,1 МПа). И лишь при пропаривании образцов с добавкой золы Новосибирской ТЭЦ прочность их составляет 13,2 МПа. Объяснить "эффект микронаполнителя" за счет только гидравлической активности невозможно, по причине значительного роста прочности бетонов (18,3...47,4 МПа)

В целях уточнения сущности "эффекта микронаполнителя", В.К.Власовым [5] проведен анализ описанных выше результатов исследований И.М.Красного, и высказано несколько замечаний.

В частности, В.К.Власов считает, что "эффект микронаполнителя" невозможно объяснить образованием дополнительных центров кристаллизации, поскольку непосредственное их действие заключается в ускорении начальной стадии химического твердения, а многочисленные исследования и практика показывают, что у бетонов с такой добавкой, как зола ТЭС, темп роста прочности в начальные сроки твердения ниже, чем без золы, а в более поздние выше.

Автор работы [5] критикует также выявленную И.М. Красным связь водоцементного отношения и среднего расстояния между частицами цемента с количеством микронаполнителя, вводимого в ряде случаев за счет замены части цемента, а в ряде случаев - за счет замены части мелкого заполнителя.

Проведенные В.К.Власовым [5] собственные экспериментальные исследования по введению в бетоны тонкодисперсных добавок - золы гидроудаления ТЭС-12 г.Москвы с удельной поверхностью $2950 \text{ см}^2/\text{г}$; высококальциевой золы-уноса от сжигания бурых углей Канско-Ачинского бассейна с удельной поверхностью $4814 \text{ см}^2/\text{г}$ и молотого кварцевого песка с удельной поверхностью $1198 \text{ см}^2/\text{г}$, позволили автору сделать вывод о том, что в основе "эффекта микрон-аполнителя" лежат как химические процессы (взаимодействие с продуктами гидратации цемента), так и физико-химические явления (влияние поверхностной энергии частиц добавок и др.).

В.Е.Крекшиным в работе [10] также установлено, что тонкодисперсные фракции песка ($< 0,14 \text{ мм}$) обладают высокой поверхностной активностью.

В зависимости от природы и степени дисперсности поверхностная активность частичек наполнителя на начальных стадиях структурообразования может быть больше, меньше или равна поверхностной активности элементарных структурных элементов цемента. В связи с этим и его роль в формировании структуры может быть различной, т.е. частички наполнителя могут быть как активными центрами, вокруг которых группируются элементарные структурные элементы цемента, образуя по В.А.Выровому и В.И. Соломатову [15] кластеры смешанного типа "вяжущее-наполнитель" ($F_f/F_c > 1$), так и самостоятельными источниками образования собственных кластеров ($F_f/F_c < 1$), где F_f и F_c - поверхностная активность частиц наполнителя и цемента.

В присутствии тонкодисперсных наполнителей происходит упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителем в бетонах.

Этот вывод делается в работах [14,17,19] на основе экспериментальных данных. В.С.Рамачандран [14] пишет, что в нормальных портландцементных бетонах зона контакта обычно менее плотная, чем массивное тесто, и включает большое количество пластинчатых кристаллов гидроксида кальция, у которых продольная ось перпендикулярна поверхности заполнителя. Следовательно, она более подвержена образованию микротрещин при растягивающих усилиях, возникающих при изменениях обычных условий температуры и влажности. Таким образом, контактная зона из-за своей структуры является наиболее слабой зоной в бетоне и поэтому оказывает большое влияние на его прочность.

В работе [17] на компьютерной модели микроструктуры контактной зоны, изучено влияние на контактную зону минеральных наполнителей, например, кремнеземистой пыли и золы-уноса. На основе статистического анализа данных показано, что введение инертных наполнителей в количестве $< 10\%$ в бетонные смеси с $V/Ц > 0,4$, практически не влияет на микроструктуру контактной зоны (кроме смесей с повышенным водоотделением).

Введение пуццолановых наполнителей в значительной степени снижает (но не исключает) капиллярную пористость контактной зоны за счет резкого уменьшения общего содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В то же время рост содержания $\text{CSH}(1)$ в непосредственной близости от поверхности заполнителя положительно сказывается на свойствах контактной зоны. В связи с этим отмечается положительное влияние на микроструктуру контактной зоны введение сравнительно небольшого количества минерального наполнителя с высокой реакционной способностью, например, кремнеземистой пыли.

При экспериментальном исследовании А.Пьер-Клодом [28] влияния добавки кремнеземистой пыли на поверхность раздела заполнителя и цементного камня в особовысокопрочном бетоне на речном гравии, установлено, что в промежуточной зоне между заполнителем и цементной матрицей в бетоне, не содержащем кремнеземистой пыли, наблюдается тонкий поризованный слой, в порах которого обнаружены этtringит и CH ; такой слой отсутствует в

бетоне с добавкой кремнеземистой пыли, где CSH(1) непосредственно контактирует с гравийным заполнителем.

Рассмотрим влияние активных гидравлических составляющих тонкодисперсных наполнителей на прочность цементных систем.

На стадии структурообразования, когда количество гидратных новообразований и необратимых контактов срастания между ними увеличивается настолько, что цементная система обретает структурную прочность, важное значение приобретают химические процессы, приводящие к существенному изменению фазового состава цементной связки в бетонах и растворах. Эти изменения заключаются в смещении баланса между первичными кристаллогидратами (портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и высокоосновные гидросиликаты кальция CSH(2)) и вторичными, более устойчивыми мелкокристаллическими гидратами (низкоосновные гидросиликаты кальция CSH(1)) в сторону последних.

В цементных системах, содержащих гидравлически активные минеральные наполнители происходит образование при твердении дополнительного количества CSH(1) за счет взаимодействия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с активным кремнеземом или алюмосиликатом наполнителя. Следствием этих процессов является образование дополнительных фазовых контактов (контактов срастания между кристаллогидратами) и увеличение плотности цементного камня, что определяет высокую прочность цементной системы.

Исследование микроструктуры бетона с низким исходным $\text{В/Ц}=0,24$ и добавкой аморфизированной кремнеземистой пыли в количестве 6% в работе С.Шендипа [27], показало отсутствие крупных пластинчатых кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и игольчатых кристаллов этtringита, высокую плотность цементной матрицы. Такая структура обуславливает высокую прочность бетона как в ранние (38 МПа через 1 сут), так и в поздние (113 МПа через 91 сут) сроки твердения. Пуццолановая активность кремнеземистой пыли проявляется уже на ранних стадиях, однако скорость ее взаимодействия с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ несколько снижается вследствие малого водосодержания системы. Это подтверждается также данными исследований приведенными в работах [14,21]. При этом отмечается, что с увеличением удельной поверхности ТМН прочность бетона возрастает.

Многие авторы [10,24] объясняют это тем, что помол наполнителей способствует увеличению их активности в цементных системах.

Так, помол золы-уноса до удельной поверхности 4000...6000 $\text{см}^2/\text{г}$ по Блейну обеспечивает разрушение агломератов зольных частиц, обнажает активные поверхности стекловидных глобулитов пишут авторы [29], что способствует повышению активности зол в цементных системах.

Л.Опоски [25] приводит данные по тонкому измельчению гранулированного доменного шлака. Установлено, что в процессе помола снижается степень полимеризации силикатного и алюминатного каркаса "шлакового стекла", и одновременно с этим часть ионов алюминия переходит из тетраэдрической в октаэдрическую координацию, характеризующуюся более слабой связью. "Квазикристаллические" компоненты (акерманит, геленит) под влиянием тонкого измельчения переходят в термодинамически метастабильное рентгено-аморфное состояние. В результате этих изменений значительно повышается гидравлическая активность шлака.

Но ТМН могут оказывать влияние на прочностные качества бетона не только прямо, но и косвенно через снижение водопотребности на стадии приготовления бетонной смеси, считают многие авторы.

В.С.Рамачандран [14] пишет, что введение тонких частиц минеральных добавок, обычно имеющих размеры 1...20 мкм, должно усиливать влияние портландцементных зерен на снижение пористости в бетонной смеси, что снижает потребность в воде для получения бетона заданной консистенции. Е.Е.Берри и В.М.Мальхотра [66], было установлено, что замена 30% цемента золой-уносом снижает водопотребность на 7% при постоянной осадке конуса. При использовании трех видов золы-уноса с различными размерами частиц было отмечено снижение водопотребности на 5...10% в растворах равной консистенции при добавлении 33, 67, или 133% золы-уноса от массы цемента [23].

И.Ю.Данилович [8] утверждает, что при введении в бетон взамен части цемента золы-уноса ТЭС, состоящей из сферических частиц с гладкой остеклованной фактурой поверхности, подвижность бетонной смеси возрастает, благодаря уменьшению внутреннего трения бетонной смеси. Причем, чем дисперснее зола, а следовательно, чем больше в ней остеклованных шарообразных частиц, тем большее пластифицирующее действие оказывает она на бетонную смесь.

Увеличение подвижности бетонной смеси при замене части цемента золой-уносом ТЭС можно также объяснить следующим. При введении золы вместо цемента объем теста вяжущего в бетоне увеличивается, так как замена цемента золой производится по массе, а плотность золы значительно меньше плотности цемента. Увеличение же объема теста вяжущего (цементно-зольного теста), при прочих равных условиях, приводит к увеличению подвижности бетонной смеси, считает И.Ю.Данилович [8].

Авторы работы [1] приводят данные по смешанному вяжущему включающему 68...73% портландцементного клинкера и 27...32% добавки летучей золы сланца-кукерсита с удельной поверхностью 3200...4000 см²/г и содержанием свободной извести 7...10%. Водопотребность данного вяжущего снижается с 0,36 до 0,34 при увеличении содержания золы сланца-кукерсита.

Исследования по использованию в качестве пластификатора гранулированного доменного шлака, размолотого до частиц различных размеров, удельная поверхность которых составляет от 5080 до 6080 см²/г по Блейну, показывает, что снижение водопотребности, требуемой для стандартного расплыва (ASTM C109), примерно на 6,4% возможно для большого количества смесей портландцемента со шлаком, содержащих от 40 до 65% шлака, замещающего цемент [20].

Не все минеральные наполнители снижают водопотребность. Например, многие исследователи установили, что использование крупнозернистой золы-уноса или золы-уноса с высокими потерями при прокаливании (обычно 10% и более) скорее увеличивает, чем снижает водопотребность. Согласно В.С.Рамачандрану [14], это происходит только в том случае, когда в золе-уносе присутствуют значительные количества ячеистых частиц кокса, обычно имеющих большой размер (100 мкм).

И.Ю.Данилович [8] объясняет это высоким водопоглощением таких частиц. Измельчение подобных зол приводит к уменьшению пористости частиц, а следовательно, к снижению водопоглощения золы. Так, измельчение крупнодисперсной золы Архангельской ТЭЦ, имеющей удельную поверхность 1320 см²/г, до 2900 и 5600 см²/г, привело к снижению водовязущего отношения в бетоне с 0,65 соответственно до 0,60 и 0,58.

Таким же образом некоторые виды высококальциевой золы-уноса могут содержать значительные количества С₃А, что приводит к увеличению водопотребности из-за потери консистенции, вызванной быстрым образованием гидроалюмината кальция или гидросульфатоалюмината.

Для минеральных наполнителей, имеющих частицы чрезвычайно малых размеров или высокую площадь поверхности (белая сажа или зола рисовой шелухи), количество воды, требуемой для нормальной консистенции, увеличивается почти прямопропорционально содержанию в массе цемента, считает В.С.Рамачандран [14].

Автор работы [3], однако, ставит под сомнение предыдущие утверждения о том, что минеральные наполнители могут являться пластификаторами. Он считает, что это мнение ошибочно, и минеральными пластификаторами служат только те вещества, которые диспергируются при их получении до коллоидного состояния. Из минеральных веществ ни молотый песок, ни шлак, ни известняк или даже зола пластификаторами быть не могут, так как никакое механическое измельчение не обеспечивает их переход в коллоидное состояние. Ссылаясь на принципы физико-химической механики по П.А.Ребиндеру, он утверждает, что чем выше степень дисперсности, тем больше воды удерживается на поверхности частиц и тем выше пластичность дисперсной фазы. Проведенные им исследования показали, что минеральными пластификаторами могут служить только шламы - смесь частиц коллоидно-молекулярного и ионного размера, образованных в результате химических реакций (выпадение осадка из раствора).

Ю.М.Баженов [4] подтверждает, что частицы коллоидных размеров создают на своей поверхности сольватную оболочку, состоящую из воды, адсорбционно связанной на поверхности твердой фазы, что придает им смазочные функции, облегчая скольжение твердых частиц одна по другой за счет действия отталкивающих сил и образования ориентированными молекулами воды плоскостей скольжения по местам более слабых водородных связей. Но бетонная смесь содержит частицы различных размеров, пишет далее Ю.М.Баженов [4], и мельчайшие частицы, осаждаясь и прилипая к поверхности более крупных зерен, теряют подвижность, и для ее увеличения необходимо введение дополнительного количества воды, что приводит к увеличению водопотребности.

С.С.Каприелов [12] также считает, что на частицах ультрадисперсных материалов образуется слой адсорбционно связанной воды, по объему сопоставимый с объемом частицы. Таким образом, пишет он далее, количество свободной воды, определяющей текучесть, сокращается на величину, сравнимую с объемом ультрадисперсного материала, а вязкость системы соответственно повышается по мере увеличения в ней объемной концентрации микронаполнителя. Но с другой стороны, адсорбционная пленка уменьшает межмолекулярное взаимодействие твердой фазы и, снижая силу сцепления между частицами на два порядка [16], ослабляет коагуляционные контакты, придавая им обратимый характер. Поэтому смешанная система с ультрадисперсным материалом из-за ослабленных коагуляционных контактов при получении вибрационного импульса разжижается. После прекращения вибрационного воздействия коагуляционные контакты восстанавливаются, система может быстро структурироваться и снова становится вязкой, что является признаком тиксотропности.

Данные экспериментов С.С.Каприелова [12] показали, что при дозировке ультрадисперсного материала в количестве до 5% массы цемента вязкость системы существенно не увеличивается, поэтому для обеспечения необходимой текучести суспензий не требуется дополнительного количества воды затворения.

Возможно, считает он, это связано с тем, что при невысоких дозировках микронаполнителя создается баланс между факторами, влияющими на текучесть: сокращение объема свободной воды в системе и незначительное увеличение количества коагуляционных контактов компенсируется слабостью этих контактов из-за оболочки адсорбционно связанной воды вокруг частиц. Повышенные дозировки ультрадисперсного материала уже приводят к увеличению водопотребности, величина которой зависит от удельной поверхности микронаполнителя и его объемного содержания в системе.

Авторами работы [2] приводится еще одна точка зрения по механизму влияния ТМН на прочность цементных бетонов. Ее сущность заключается в том, что тонкодисперсные наполнители оказывают влияние на дифференциальную пористость цементного камня ЦК, характеризующейся разноразмерностью пор (фактор многограновости пористости) и неоднородностью их распределения в объеме.

Гранулы наполнителя, размещаясь между частицами цемента, существенно корректируют исходную дифференциальную пустотность водовяжущей пасты в сторону меньших по размеру пустот, что обуславливает формирование цементного камня с меньшими размерами капиллярных пор, диспергированной капиллярной пористостью по сравнению со структурой без наполнителя.

В работе А.Г.Ольгинского [13] отмечается, что помимо влияния на прочностные характеристики цементных систем, добавки тонкодисперсных минеральных наполнителей, в частности пылевидных отходов дробления каменных материалов (гранит, песчаник, известняк, кристаллический сланец), повышают водо- и коррозионную стойкость, уменьшают водопоглощение и усадку бетона. Объясняется это формированием более плотной структуры цементных бетонов.

Выводы

Как показал анализ литературных источников, среди ученых нет единого мнения по механизму влияния ТМН высокой дисперсности на структуру и свойства цементных бетонов.

В литературе выделяются несколько основных факторов положительного влияния ТМН на структуру и физико-механические характеристики цементных композиций:

- снижение общей пористости цементного камня в бетоне при увеличении объемной концентрации и дисперсности наполнителя;
- связывание гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ кристаллогидратной связки аморфизированным кремнеземом SiO_2 пуццолановых наполнителей, повышение пуццоланической активности наполнителя при его тонком измельчении;
- ускорение начальной стадии химического твердения цементных систем с частицами наполнителя, служащими центрами кристаллизации;
- образование кластеров “вяжущее-наполнитель” за счет высокой поверхностной энергии частиц наполнителя;
- упрочнение контактной зоны между цементным камнем и заполнителями в бетонах;
- снижение водопотребности бетонных смесей рядом наполнителей разной минералогической природы и дисперсности;
- упрочнение бетонов путем снижения дифференциальной пустотности исходной водовяжущей пасты в сторону меньших по размеру пустот при размещении гранул наполнителя между частицами цемента, что обуславливает формирование цементного камня с меньшими размерами капиллярных пор.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с.798065 СССР. Вяжущее /В.Х.Кикас, Э.И. Пиксарв, Л.В.Раадо, И.А.Лаул, А.А.Хайн. - Опубл.в Б.И. -1991. -№3.
2. Аспекты формирования высокопрочных и долговечных цементных связей в технологии бетонов /Бабков В.В., Каримов И.Ш., Комохов П.Г.//Известия ВУЗов. Стр-во. -1996. -№4. - С.41-48.
3. Аль-Джунейд И. Улучшение качества цементных композиций добавками шламовых промышленных отходов: Дис....канд. техн. наук: 05.23.05 -Защищена 25.03.94; Утв. 22.06.94; - Самара., 1994. -145 с. -Библиогр.: С.29-30.
4. Баженов Ю.М. Технология бетона: Учеб. пособие -М.: Высш. шк., 1987. -415 с.: ил.
5. Власов В.К. Механизм повышения прочности бетона при введении микронаполнителя //Бетон и железобетон. -1988. -№10. -С.9-11.
6. Власов В.К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками //Бетон и железобетон. -1993. -№4. -С.10-12.
7. Высоцкий С.А. Минеральные добавки для бетонов //Бетон и железобетон. -1994. -№2. -С.7-10.
8. Данилович И.Ю., Сканапи Н.А. Использование топливных шлаков и зол для производства строительных материалов. -М.: Высш. шк., 1988.-72 с.
9. Зоткин А.Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне//Бетон и железобетон.-1994.-№3.-С.7-9.
10. Крекшин В.Е. О влиянии тонкодисперсных фракций песка на микроструктуру бетона //Соверш. стр-ва назем. объектов нефт. и газ. пром-сти. Сб.науч.трудов НПО "Гидротрубопровод". -М., 1990. -С.23-26.
11. Красный И.М. О механизме повышения прочности бетона при введении микронаполнителей //Бетон и железобетон. -1987. -№5. -С.10-11.
12. Каприелов С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов //Бетон и железобетон, -1995. -№6. -С.16-20.
13. Ольгинский А.Г. Пылеватые минеральные добавки к цементным бетонам //Строительные материалы и конструкции, -1990. -N3. -С.18.
14. Рамачандран и др. Добавки в бетон: Справ. пособие /В.С.Рамачандран, Р.Ф.Фельдман, М.Коллепарди и др.; Под ред. В.С.Рамачандрана. -М.: Стройиздат, 1988. -С.168-184.
15. Соломатов В.И. и др. Композиционные строительные материалы и конструкции повышенной материалоемкости. Киев: Будивельник, 1991. -144 с., ил.
16. Урьев Н.Б. Высококцентрированные дисперсные системы. -М.: Химия, 1980. -320 с.:ил.

17. Bendz Dale P., Garfodzi Edward J. Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone //ACI Mater. J.. -1991. -V88. -№8. -pp.518-529.
18. Berry E.E., Malhotra V.M. Fly Ash for Use in Concrete - A Critical Review //ACI Journal. -1982. -V2. -№3. -pp. 59-73.
19. Feng Nai-Qian, Li Gui-Zhi, Zang Xuan-Wu. High-strength and flowing concrete with a zeolitic mineral admixture //Cem., Concr., and Aggreg. -1990. -V12. -№2. -pp.61-69.
20. Hogan F.J., Meusel J.W. Evaluation for Durability and Strength Development of a Ground Granulated Blast Furnace Slag //Cements, Concrete and Aggregates. -1981. -V3. -№1. -pp.40-52.
21. Larbi J.A., Bijen J.M. The chemistry of the pore fluid of silica fume-blended cement systems //Cem. and Concr. Res. -1990. -V20. -№4. -pp.506-516.
22. Larbi J.A., Bijen J.M. Effect of water-cement ratio, quantity and fineness of sand on the evolution of lime in set portland cement systems //Cem. and Concr. Res. -1990. -V20. -№5. -pp.783-794.
23. Lane R.O., Best J.F. Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete //Concrete International. -1982. -V4. -№7. -pp.81-92.
24. Matsufuji Y., Kohhata H., Harada S. Прочностные характеристики растворов содержащих сверхтонкие частицы. //Semento konkurito ronbunshu = CAJ Proc. Cem. and Concr. -1991. -№45. -C.264-269.
25. Opoczky Ludmilla. Kohosalak mechanikai akti-valasa finomorlessel //Epitoanyag. -1990. -V42. -№3. -pp.81-84.
26. Roberts L.R., Grace W.R. Microsilica in concrete.1 //Mater. Sci. Concr.1. -Westerville (Ohio), 1989. -pp.197-222.
27. Sarkar Shendeep L. Mikrostruktura of a very low water/cement silica fume concrete //Microscope -1990. -V38. -№2. -pp.141-152.
28. Sarkar Shondeep L., Diatta Yaya, Autcin Pierre-Claude. Microstructural study of aggregate /hydrated paste interface in very high strength river gravel concretes //Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec.2-4, 1987. -Pittsburgh. -1988. -pp.111-116.
29. Xu Ziyi, Liu Linzhy. Research on superfine flyash and its activity //Proc. Beijing Int. Symp. Cem. and Concr., Beijing, May 14-17, 1985. Vol.1. -Beijing. -1986. -pp.493-507.