

Микрокремнезём и его применение в строительстве.



Микрокремнезем получают при высокотемпературной обработке кремнеземосодержащих исходных материалов, связанной с процессом возгонки оксидов кремния. При конденсации возгона в процессе охлаждения образуется мелкодисперсный **коллоидообразный**, большей частью аморфный материал. Преобладающий размер частиц микрокремнезема от 1 до 0,01 мкм и менее. Рентгеноструктурным анализом установлено наличие в микрокремнеземе оксида кремния в виде коусита – SiO , что придает ему высокую химическую активность в водных средах.

Микрокремнезем представляет собой очень мелкие шарообразные частички аморфного кремнезема со средней удельной поверхностью около 20 кв. м/г. По гранулометрическому составу средний размер частиц МК составляет около 0,1 микрона, то есть в 100 меньше среднего размера зерна цемента.

При использовании микрокремнезема для изготовления особо прочных бетонов тысячи сферических микрочастиц окружают каждое зерно цемента, уплотняя цементный раствор, заполняя пустоты прочными продуктами гидратации и улучшая сцепление с заполнителями, гораздо эффективнее, чем другие минеральные добавки, такие как цеолитовый туф, доменный и котельный шлак.

В результате микрокремнезем, как высокореакционный пуццолан способствует получению более прочного и долговечного цементного камня. Практическое использование показало, что 1 кг микрокремнезема обеспечивает такую же прочность, как 4-5 кг обычного портландцемента. Высокие свойства микрокремнезема улучшают такие характеристики бетона, как прочность на сжатие, прочность сцепления, износостойкость, морозостойкость, химическую стойкость и значительно снижают проницаемость. Это позволяет длительное время противостоять внешним природным и производственным воздействиям (средам).

Преимущества применения микрокремнезема.

Наращение прочности.

Микрокремнезем обеспечивает прочность на сжатие, намного превышающую прочность обычных бетонов, и здесь ограничивающим фактором является только прочность заполнителя. При использовании природных заполнителей достигается прочность свыше 150 N/mm², а при использовании специальных высокопрочных заполнителей можно достичь прочности 300 N/mm².

Проницаемость.

Эффект заполнения пор, создаваемый пуццолановыми сферическими микрочастицами, способствует значительному уменьшению капиллярной пористости и проницаемости бетона. Фактически непроницаемый бетон можно получить при умеренном содержании микрокремнезема и сравнительно низком содержании обычного портландцемента. Поскольку микрокремнезем оказывает большее влияние на проницаемость, чем на прочность, бетон с содержанием микрокремнезема всегда будет гораздо менее проницаемым, чем бетон эквивалентной прочности на обычном портландцементе.

Защита арматуры.

Исследования бетонных конструкций в возрасте до 12 лет (Норвегия, Швеция) показали, что высококачественные бетоны с содержанием микрокремнезема обладают большей устойчивостью к карбонизации, чем бетоны такой же прочности на обычном портландцементе, и гораздо лучше предотвращают проникновение хлоридов из морской воды.

Морозостойкость.

Низкая проницаемость и повышенная плотность цементного камня обеспечивают прекрасную морозостойкость бетона с микрокремнеземом. Не существует несовместимости микрокремнезема с воздухововлекающими добавками, в действительности стабильная реологическая структура пластичного бетона с микрокремнеземом уменьшает потерю вовлеченного воздуха при транспортировке и вибрировании.

Химическое воздействие.

Известно, что низкая проницаемость и низкое содержание свободной извести повышает устойчивость бетона к воздействию агрессивных химических веществ. Бетон с содержанием микрокремнезема обладает этими качествами и проявляет устойчивость к воздействию целого ряда веществ. Долгосрочные полевые испытания показали, что по своей потенциальной устойчивости к сульфатам он равен сульфатостойкому портландцементу.

Основные показатели:

- Уменьшенный до 200-450 кг/м³ расход цемента.
- Высокая прочность (прочность на сжатие 60-80 МПа) и сверхвысокопрочные (прочность на сжатие выше 80 МПа) бетоны, в т. ч. мелкозернистые.
- Бетоны с высокой ранней прочностью при твердении в нормальных условиях (25-40 МПа в сутки).
- Высокоподвижные (ОК=22-24 см) бетонные смеси повышенной связности - нерасслаиваемости.
- Повышенная антикоррозионная стойкость. Добавление микрокремнезема снижает водопроницаемость на 50%, повышает сульфатостойкость на 100%.
- Низкая проницаемость для воды и газов W12-W16.
- Морозостойкость F200-F600 (до F1000 со специальными добавками).
- Повышенная долговечность (стойкость к сульфатам и хлоридной агрессии, воздействию слабых кислот, морской воды, повышенной до 400 °C температур и морозостойкости).

Экономическое обоснование.

Немаловажно отметить, что применение микрокремнезема конденсированного в массовом строительстве также позволяет экономить до 40% цемента без ухудшения характеристик бетона и сокращать расход **тепловой энергии** при тепловлажной обработке изделий. Использование микрокремнезема в сборном бетоне позволяет уменьшить сечения некоторых элементов, облегчая их транспортировку и монтаж.

Микрокремнезем обеспечивает более длительную жизнеспособность жидких растворов, облегчает перекачивание смеси, придает коррозионную стойкость. При использовании микрокремнезема достигается наивысшие характеристики высокопрочного бетона, легкого бетона, торкретбетона и бетона с пониженной водопроницаемостью.

Ещё в 2004 году по данным расчёта Красноярской государственной архитектурно-строительной академии получилось, что расход портландцемента для получения высокопластичного бетона марки «300», при использовании микрокремнезёма, снижается на 43 %. Экономический эффект на 1 м³ бетона составил 190, 278 рублей по сырью. Образцы высокопрочного бетона М 700 с добавкой микрокремнезёма были получены с экономической выгодой 77, 239 рублей на 1 м³ бетона. Это произошло за счёт экономии дорогостоящих добавочных материалов.

Опыт использования.

Первоначальный интерес к применению микрокремнезема в бетонах отмечен в 1971 г. на металлургическом заводе «Фиско» в Норвегии. Новые возможности использования тесно связаны с прогрессом в области создания суперпластификаторов. Их сочетание дало толчок к созданию бетонов нового поколения, обладающих высокой прочностью (от 60 до 150 МПа), повышенной удобоукладываемостью и долговечностью.

Частота применения порошка микрокремнезема в качестве добавки 1975 году повлекла за собой принятие норвежских стандартов для микрокремнезема в цементе (1976 г.) и в бетоне (1978 г.). В Канаде использование микрокремнезема в бетоне было одобрено в 1981 году. В том же году первые промышленные смеси портландцемент/микрокремнезем были произведены в Исландии. В Канаде такие смеси появились в 1982 году. На данный момент микрокремнезем в Европе используется везде - от бетонных блоков до нефтяных сооружений.

Многолетняя широкая популярность микрокремнезёма в европейских странах обусловлена низкой стоимостью по отношению к другим добавкам и, одновременно, уникальными возможностями, позволяющими получать из рядовых материалов бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками и уникальными конструкционными возможностями, например, бетоны, известные в мире как High Performance Concrete. Ключевым фактором технологии производства таких бетонов являлось комплексное использование микрокремнезема и суперпластификаторов.

Для наглядности достаточно отметить несколько примеров применения высокопрочных бетонов на основе микрокремнезёма при возведении: комплекс высотных зданий в Чикаго, тоннель под Ла-Маншем, мост через пролив Нортумберленд в Канаде, ряд мостов в Японии, Норвежские морские буровые платформы в Северном море. Только в Москве за последние десятилетия при помощи микрокремнезема были возведены и реконструированы такие объекты как: Торгово-рекреационный комплекс «Охотный ряд» на Манежной площади, здания Кремля, Ульяновская эстакада, постамент памятника «Петру I», Железнодорожный мост по ул. Шереметьевская, коллектор для инженерных коммуникаций под ул. Б. Дмитровка, здание «Смоленский Пассаж», транспортные тоннели и пешеходные переходы на Кутузовском и Ленинском проспектах, шумозащитные стенки и путепроводы на МКАД, дюкер коллектора Люберецкой станции аэрации, денежное хранилище «СДМ Банка», торговый центр на Курском вокзале, стилобатная часть здания «Реформы», подземный комплекс «Парк-Сити» ММДЦ «Москва-Сити», транспортный тоннель на проспекте Мира, стадион «Локомотив», транспортный тоннель на ул. Н. Масловка, транспортный тоннель на Нахимовском проспекте, облицовочная плитка и элементы декора для малоэтажного и коттеджного строительства, Лефортовский транспортный тоннель, диаметром 16м, развязки третьего транспортного кольца на ул. Кожуховская, Загороднее шоссе, ул. Красная Пресня, мост на ул. Братиславская, путепровод на ул. Олений Вал, путепровод тоннельного типа «Дворцовый мост», коллектор для инженерных коммуникаций под ул. Народная, Филевский канализационный коллектор, диаметром 3,6 метра под Карамышевской наб., бассейны на ул. Бакулева и Привольная, Московский зоопарк, комплекс высотных жилых зданий «Кунцево», а также мосты и путепроводы в Москве, Калуге и Орле.

Технологическое использование.

Технологическое использование микрокремнезёма (дозирование и подача), предполагает два решения: в сухом виде и в виде водной суспензии.

Первый вариант (сухой) предполагает использование микрокремнезема с золой-уноса и суперпластификатора (например С-3).

Во-втором варианте (жидкий), микрокремнезем в виде суспензий используется в качестве минеральной добавки для бетонов.

СПОСОБ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ МИКРОКРЕМНЕЗЁМА №1.

Способ приготовления водной суспензии микрокремнезема, включает смешивание микрокремнезема, воды и стабилизирующего компонента. В качестве стабилизирующего компонента используют смесь нитрилотриметиленфосфоновой кислоты и продукта конденсации бета- нафталинсульфокислоты с формальдегидом при следующем соотношении компонентов, масс (формула технологического процесса):

микрокремнезем 40-70 %

стабилизатор (нитрилотриметиленфосфоновая кислота) 0,02-0,14

продукт конденсации бета-нафталинсульфокислоты с формальдегидом 0,02-0,14

вода - 29, 44 — 59,90 %.

Компоненты интенсивно перемешиваются до образования однородной суспензии 40-70%-ной концентрации.

Описание процесса.

Смесь нитрилотриметиленфосфоновой кислоты и продукта конденсации β - нафталинсульфокислоты с формальдегидом, приводит к диспергации агрегатов частиц микрокремнезема, более полному связыванию ионов металлов на поверхности частиц в малорастворимые комплексы, образованию малопроницаемых адсорбционных слоев и модифицированию двойного электрического слоя на поверхности частиц микрокремнезема. Это приводит к совокупному стерическому и электростатическому эффекту стабилизации суспензии, благодаря чему увеличивается агрегативная устойчивость и текучесть во времени и, как следствие, повышается ее активность как минеральной добавки для бетона.

СПОСОБ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ МИКРОКРЕМНЕЗЁМА №2.

Способ приготовления концентрированных стабильных суспензий из микрокремнезема, включающий перемешивание водной суспензии. Микрокремнезем 70-75% концентрации смешивается со стабилизирующим компонентом соляной, серной, или уксусной кислотами (0,35% 0,74% 0,37% массы МК соответственно). В данном способе, стабилизатор соляной, серной или уксусной кислоты вызывает сравнительно кратковременный эффект агрегативной устойчивости суспензии (до 15 суток), так как кислота постоянно нейтрализуется щелочными компонентами микрокремнезема. Поэтому при длительном хранении или транспортировке суспензии происходит **агрегирование** частиц микрокремнезема и возникает необходимость периодически добавлять новые количества кислоты, что, в свою очередь, приводит к снижению активности суспензии из микрокремнезема как добавки в бетон.

Свойства микрокремнезема.

Первоначально микрокремнезем использовался как заменитель цемента, но по мере накопления данных его стали применять в качестве дополнительного компонента, улучшающего характеристики бетона, как в свежееуложенном, так и в затвердевшем состоянии. На сегодняшний день во всем мире существует более десяти стандартов и технологических норм, позволяющих использовать микрокремнезем в цементах и бетонах, а в конце 1996 года утвержден новый европейский стандарт. За несколько десятилетий микрокремнезем превратился из заменителя цемента в высокотехнологичную добавку, которая использовалась в ряде крупных проектов, таких, как мост Сторебелт в Дании, мост Цин Ма в Гонконге и Саус Уэкер 311 в Чикаго - одно из самых высоких зданий в мире. Сырой микрокремнезем, имеющий насыпную плотность около 200 кг/м³., может быть обработан несколькими способами для удобства в применении.

Основные формы микрокремнезема.

Неуплотненный микрокремнезем.

Его плотность обычно составляет 200-350 кг/м³. Собраный из фильтров мелкий порошок очень легкий и используется в производстве составов - фасованных материалов, строительных и цементных растворов.

Уплотненный микрокремнезем.

Материал обработан в целях увеличения плотности до 500-600 кг/м³ и свободной **агломерации** частиц. Этот материал является не таким пылеобразным, как неуплотненный микрокремнезем, и имеет вид мелких гранул. Он более удобен в обращении и применяется в некоторых составах, сборном железобетоне и готовой бетонной смеси.

Гранулированный микрокремнезем.

Материал имеет плотность около 1000 кг/м³ и обработан с добавлением небольшого количества воды для получения твердого агломерата. Обычно он используется только для совместного измельчения с цементом и без измельчения не рассеивается.

Суспензия.

Водная суспензия неуплотненного микрокремнезема, обычно 50% по весу. Материал имеет удельный вес 1.4 и благодаря своему жидкому состоянию, он более удобен в обращении, чем порошок.

Производство суспензии.

В целях оптимизации качества и стабильности суспензия производится в фильтрационном блоке сразу после сбора микрокремнезема. Хотя иногда суспензии изготавливаются прямо на участке в таких районах, как Ближний Восток, в действительности они представляют лишь способ предварительного смачивания микрокремнезема и легко оседают. Следовательно, они пригодны только для немедленного использования. Существуют и стабилизированные суспензии, но они содержат прочие добавки, которые могут воздействовать на бетон и не всегда соответствуют спецификациям бетона.

Использование в производстве бетона.

Микрокремнезем обычно добавляется в качестве дополнительного вяжущего материала в процентном отношении от первоначального содержания цемента, в зависимости от типа или требуемого качества бетона. Дозировка может быть следующей:

бетон, подаваемый насосом 2-3%

высокое качество 4-7%

высокая прочность* 7-15%

торкрет-бетон 8-12%

подводный бетон 12-15%

* Также для высокой непроницаемости и химической стойкости.

Процедуры смешивания могут отличаться в зависимости от производственного оборудования. Общее правило заключается в тщательном перемешивании для обеспечения

максимальной **дисперсии** микрокремнезема в бетоне. В целях улучшения дисперсии в большинство бетонов с содержанием микрокремнезема вводят пластификатор или суперпластификатор.

Свежеуложенный бетон.

Бетоны с содержанием микрокремнезема обладают большей способностью к сцеплению, чем обычные смеси на поргладцементе, и зачастую показывают более низкую удобообрабатываемость с точки зрения осадки конуса. Частицы микрокремнезема, имеющие абсолютно сферическую форму, нейтрализуют этот эффект, обеспечивая лучшую удобоукладываемость при данной осадке конуса. Однако, во избежание добавления на участке хорошо известного «пластификатора» - воды, в смесь

вводится суперпластификатор для достижения высокой удобообрабатываемости при сохранении правильного водоцементного отношения.

Высокое сцепление и стабильность смеси означает, что бетоны с содержанием микрокремнезема являются наиболее подходящими для торкретирования, подачи насосом и подводного бетонирования. Торкрет-бетон в этом случае отличается меньшим отскоком, значительно меньшим пылеобразованием и лучшими строительными характеристиками. При подаче насосом бетон можно подавать выше и дальше, чем обычные смеси, и под более низким давлением. Бетон с содержанием кремнезема также можно укладывать под водой обычными методами подводного бетонирования, без всяких дополнительных примесей.

Вследствие заполнения пустот и высокого сцепления смеси в свежесуложенном бетоне наблюдается незначительное выступание воды. Это означает, что свежесуложенный бетон необходимо должным образом выдерживать сразу по завершении отделочных работ. Для этого можно использовать стандартные выдерживающие процедуры в соответствии с BS 1881.

Затвердевший бетон.

Размер частиц микрокремнезема, в 100 раз меньших, чем цемент, в сочетании с высоким содержанием двуоксида кремния создает очень мощный пуццолановый эффект. При таком размере частиц 40 кг микрокремнезема, составляющие среднюю дозировку, будут иметь площадь поверхности около одного квадратного километра, вступающей в реакцию с гидроксидом кальция, высвобождаемого по мере гидратации цемента. Это означает, что микрокремнезем оказывает более ранний эффект, чем другие пуццолановые добавки, но также не помешало бы использовать летучую золу и гранулированный доменный шлак. Действительно, тройная смесь вяжущих материалов создает бетон с очень высокими рабочими характеристиками. Такие смеси применялись в ряде крупных проектов, включая мосты: Сторелбелт, Цин Ма.

Пуццолановая реакция микрокремнезема повышает гидратацию силиката кальция. Наблюдается отчетливое изменение пористой структуры бетона с содержанием микрокремнезема в сторону уменьшения числа капиллярных пор и увеличения числа более мелких гелевых пор. Повышение гидратации силиката кальция и снижение числа капиллярных пор обеспечивают две основные характеристики бетона с содержанием микрокремнезема - повышенную прочность и повышенную непроницаемость. Двойной эффект придает бетону большую устойчивость к физическим (истирание, эрозия и ударное разрушение) и химическим воздействиям (проникновение воды, сульфатов, хлоридов, органических веществ и кислот).

Именно благодаря повышенной стойкости бетона с содержанием микрокремнезема к сульфатам и хлоридам он использовался в Персидском заливе, где химическое воздействие и температура быстро разрушают железобетон и некоторые сооружения приходится сносить уже через десять лет.

Ожидаемый срок эксплуатации сооружений, строящихся сегодня, составляет более 50 лет. Благодаря возможности применения высокопрочного (80 МПа) бетона с содержанием микрокремнезема в Персидском заливе сейчас также возводятся более высокие здания. Самое высокое из них имеет в высоту 157 метров, а проектная высота Чикаго Бич Тауэр в Дубаи - 321 метр.

В Великобритании бетон с содержанием микрокремнезема применяется там, где можно получить наибольшую пользу от его повышенной прочности и непроницаемости. Компании, занимающиеся [переработкой отходов](#), скрапные дворы и металлоперерабатывающие предприятия используют физические характеристики бетона с содержанием микрокремнезема, что позволяет сохранять хорошее состояние рабочих площадок сроком до десяти лет, тогда как раньше бетон меняли каждые 18 месяцев. Химическая стойкость и непроницаемость снижают риск, исходящий от опасных химикатов и загрязняющих веществ в системе грунтовых вод с предприятий, складов удобрений, силосных ям и полей орошения.

Одной из основных сфер применения микрокремнезема в Великобритании являются покрытия, где бетон с микрокремнеземом использовался в ряде крупных проектов. Его применение в данной

области обусловлено быстрым нарастанием прочности и низкой усадкой в сочетании с высокой устойчивостью к истиранию и химической стойкостью.

Среди недавних проектов были два региональных **дистрибьюторских** центра для сети магазинов. В каждом случае внутреннее покрытие склада равнялось по площади четырем футбольным полям, и на него потребовалось свыше 9000 м³ бетона с микрокремнеземом. Одно из них используется в качестве долговременной испытательной площадки для анализа усадки плиты. В Шотландии 2000 м³ бетона на тройной смеси - обычный портландцемент/ гранулированный доменный шлак/ микрокремнезем - пошло на укладку пола нового предприятия, где решающими факторами являются высокая устойчивость к истиранию и химическая стойкость. В Великобритании также используется торкрет-бетон с микрокремнеземом, например, при прокладке линий лондонского метрополитена.

Микрокремнезем образуется в процессе выплавки сплавов кремния (ферросилиция). После окисления и конденсации некоторая часть монооксида кремния образует чрезвычайно мелкий продукт в виде ультрадисперсного порошка, частицы которого представляют собой частички аморфного кремнезема со средней удельной поверхностью около 20 кв. м/г. Средний размер гранул составляет около 0,1 микрона, то есть в 100 меньше среднего размера зерна цемента.

По сути, микрокремнезем - это высокореакционный пуццолан и нужен для получения более долговечного и прочного цементного камня.

Использование микрокремнезема позволяет получать из рядовых материалов бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками и уникальными конструктивными возможностями:

Стойкость к истиранию.

Высокоподвижные (ОК=22-24 см) бетонные смеси повышенной связности - нерасслаиваемости.

Высокая прочность (прочность на сжатие 60-80 МПа) и сверхвысокопрочные (прочность на сжатие выше 80 МПа) бетоны, в т. ч. мелкозернистые.

Бетоны с высокой ранней прочностью при твердении в нормальных условиях (25-40 МПа в 1 сут).

Уменьшенный до 200-450 кг/м³ расход цемента.

Повышенная антикоррозионная стойкость. Добавление МК снижает водопроницаемость на 50%, повышает сульфатостойкость на 100%.

Низкая проницаемость для воды и газов W12-W16.

Морозостойкость F200-F600 (до F1000 со специальными добавками).

Повышенная долговечность (стойкость к сульфатной и хлоридной агрессии, воздействию слабых кислот, морской воды, повышенной до 40°C температур и морозостойкости).

Норвежский Технологический Институт изучает свойства бетона с содержанием микрокремнезема уже 35 лет. Расширение применения порошка микрокремнезема в готовых бетонных смесях с 1975 привело к принятию норвежских стандартов для микрокремнезема в цементе (1976) и в бетоне (1978).

В Канаде использование микрокремнезема в бетоне было одобрено в 1981, в том же году первые промышленные смеси портландцемент/микрокремнезем были произведены в Исландии. В Канаде такие смеси появились в 1982. Микрокремнезем используется везде - от бетонных блоков до нефтяных сооружений, и его рабочие качества исследуются и проверяются по всему миру.

Химические и физические характеристики.

Частицы микрокремнезема имеют гладкую поверхность и сферическую форму. Средний размер частиц составляет 0,1-0,2 микрон, то есть они в 50-100 раз мельче цемента или летучей золы, а удельная площадь поверхности составляет от 13000 до 25000 м²/кг. Порошок фактически состоит из рыхлых агломератов с очень низкой насыпной плотностью. По сравнению с другими вяжущими материалами, микрокремнезем отличается очень высоким содержанием реактивного кремнезема и мелкокостью.

Воздействие на свойства бетона

Суспензии и порошки существенно отличаются только по своему воздействию на пластичный бетон.

Их влияние на свойства затвердевшего бетона одинаково. Поскольку суспензии микрокремнезема без

примесей, вероятно, представляют наибольший интерес для производителей бетона, в остальной части текста термин “микрокремнезем” употребляется по отношению к 50% водной суспензии, если не указано иное. Дозировка микрокремнезема выражается в процентном содержании твердого микрокремнезема от массы цемента. Вес добавляемой в смесь суспензии в два раза превышает вес требуемого твердого микрокремнезема.

Пластические свойства

Опыт работы показал, что правильно составленная бетонная смесь, содержащая менее 300 кг/м³ обычного портландцемента и менее 10% микрокремнезема, практически не отличается по водопотребности по сравнению с обычными смесями с тем же общим содержанием вяжущих. На первый взгляд свежеприготовленная бетонная смесь кажется очень жесткой, однако, ее намного легче подавать насосом, укладывать и отделывать. В работе с микрокремнеземом наблюдалось интересное поведение смеси - повышение удобообрабатываемости после длительного перемешивания или прохождения через бетононасос.

Рассеявшись по объёму, мельчайшие частицы микрокремнезема уплотняют и стабилизируют смесь и существенно снижают выступание воды и расслоение. В жирных смесях это может привести к образованию трещин при пластической усадке, поскольку вода, испаряющаяся с поверхности, не заменяется выступающей водой. Поэтому, в жаркую или ветреную погоду необходимо уделять особое внимание защите и выдерживанию бетона.

Наращение прочности.

Как и все пуццолановые материалы, микрокремнезем вступает в реакцию с гидроксидом кальция, освобождаемой при гидратации портландцемента для образования вяжущих соединений. Очень высокая чистота и мелкость микрокремнезема способствует более эффективной и быстрой реакции. При надлежащем рассеивании тысячи реактивных сферических микрочастиц окружают каждое зерно цемента, уплотняя цементный раствор, заполняя пустоты прочными продуктами гидратации и улучшая сцепление с заполнителями.

Микрокремнезем может обеспечить прочность на сжатие, намного превышающую прочность обычных бетонов, и здесь ограничивающим фактором является только прочность заполнителя. Темпы нарастания прочности обычного бетона с содержанием микрокремнезема слегка отличается по сравнению с современными бетонами на обычном портландцементе. Обычно через 7 дней он приобретает только 55-65% от 28-дневной прочности при выдерживании при температуре 20 гр. С. Основная пуццолановая активность протекает между 7 и 20 днями.

Опыт показал, что 1 кг микрокремнезема может обеспечивать такую же прочность, как 3-5 кг обычного портландцемента, в смесях одинаковой удобообрабатываемости при умеренном содержании микрокремнезема и цемента в обеих смесях. На эту вяжущую эффективность или К-фактор оказывает влияние содержание обоих материалов, но при содержании обычного портландцемента 200-300 кг/м³ и микрокремнезема - менее 10%, значение К-фактора может составлять около 4.

В Норвегии средняя дозировка микрокремнезема для смесей обычной прочности составляет 8%. При добавлении микрокремнезема в количестве до 30% в сочетании с суперпластификаторами можно получить смеси с отношением вода/вяжущие ниже 0,3. При этом качество бетонных изделий аналогично качеству, получаемому при известной технологии СИСТРОМ.

Такие бетоны могут достигать очень высокой ранней прочности, но важно осуществлять выдерживание во **влажном** режиме. Выдерживание в сухом режиме ведет к самовысушиванию и желаемый результат может быть и не достигнут. Так, в теплое время года, наше производство использует герметизацию поверхности упаковки пленкой.

Известно, что пуццолан более чувствителен к изменениям температуры, нежели портландцемент, и микрокремнезем - не исключение. При низких температурах пуццолановая реакция замедляется, а при высоких - ускоряется, причем в обоих случаях значительно по сравнению с портландцементом. По количеству теплоты, выделяемой при гидратации, микрокремнезем находится между обычным портландцементом и портландцементом RHPC, хотя нарастание теплоты происходит медленнее. Для

смесей эквивалентной прочности тепловыделение в целом будет меньше, поскольку общее содержание вяжущих материалов значительно снижено.

Щелочность.

Доказано, что микрокремнезем оказывает существенное влияние на щелочность воды в порах цементного геля. Пуццолановая реакция, по-видимому, приводит к образованию геля с высоким содержанием кремнезема, связывающего щелочные металлы, и возможно, с высоким содержанием связанной воды. Уровень **водородного** показателя pH воды в порах бетона на обычном портландцементе равен 14. При добавлении даже умеренного количества микрокремнезема он очень быстро снижается до 13. При добавлении свыше 15% микрокремнезема в конечном счете забирает из воды в порах практически все ионы щелочных металлов, понижая уровень pH до 12,5. При добавлении около 25% микрокремнезема нейтрализует всю свободную известь, освобожденную силикатами портландцемента. При этом общий уровень pH бетона не снижается до того, что это оказывает неблагоприятное воздействие на инертность арматуры.

Проницаемость.

Эффект заполнения пор, создаваемый пуццолановыми сферическими микрочастицами, способствует значительному уменьшению капиллярной пористости и проницаемости бетона. Фактически непроницаемый бетон можно получить при умеренном содержании микрокремнезема и сравнительно низком содержании обычного порландцемента. Поскольку микрокремнезем оказывает большее влияние на проницаемость, чем на прочность, бетон с содержанием микрокремнезема всегда будет гораздо менее проницаемым, чем бетон эквивалентной прочности на обычном портландцементе.

Морозостойкость.

Низкая проницаемость и повышенная плотность цементного камня обеспечивает прекрасную морозостойкость бетона с микрокремнеземом. По всей видимости, не существует теоретической несовместимости микрокремнезема с воздуховолекающими добавками, в действительности стабильная реологическая структура пластичного бетона с микрокремнеземом должна уменьшать потерю вовлеченного воздуха при транспортировке и вибрировании.

Химическое воздействие.

Известно, что низкая проницаемость и низкое содержание свободной извести повышает устойчивость бетона к воздействию агрессивных химических веществ. Бетон с содержанием микрокремнезема обладает этими качествами и проявляет прекрасную устойчивость к воздействию целого ряда веществ. Долгосрочные полевые испытания в Норвегии показали, что по своей потенциальной устойчивости к сульфатам он равен сульфатостойкому портландцементу.

Получение микрокремнезема.

В основном микрокремнезем поставляют заводы ферросплавов, где он осаждается на фильтрах металлургических печей. Недорогой микрокремнезем можно получить также при сжигании сельскохозяйственных или древесных отходов. Например, микрокремнезем высокой степени чистоты получается при сжигании рисовой шелухи в установках ЛУЗОЛ-ЭТ.