

Применение микрокремнезема на бетонных производствах



Микрокремнезем значительно повышает прочность, морозоустойчивость, проницаемость, износостойкость и другие качества многих строительных материалов.

В середине 80-х годов в мировой строительной практике появились бетоны с высокими эксплуатационными свойствами. Для них характерно то, что высокая (55–80 МПа) и сверхвысокая (выше 80 МПа) прочность на сжатии, низкая проницаемость, повышенная коррозионная стойкость и долговечность достигаются при применении высокоподвижных бетонных смесей, а конструкциям и сооружениям, возведенным с их использованием, как правило, присущи яркие эстетические достоинства. Ключевым фактором технологии производства таких бетонов являлось комплексное использование высокоактивной минеральной добавки – микрокремнезема.

Микрокремнезем (далее – МК) образуется в процессе выплавки ферросилиция и его сплавов. После окисления и конденсации некоторая часть монооксида кремния образует чрезвычайно мелкий продукт в виде шарообразных частиц с высоким содержанием аморфного кремнезема. МК активно используется в производстве сухих строительных смесей, бетона, пенобетона. Также с его помощью производят **цемент**, керамику, облицовочные плиты, черепицу, огнеупорные массы, резину. Он применяется в мостостроении, дорожном строительстве, при возведении жилых и производственных объектов, плотин и дамб, буровых платформ и скважин, коллекторных трасс.

Популярность МК объясняется его уникальной способностью позитивно влиять на свойства строительных материалов, улучшая их качественные характеристики: прочность, морозоустойчивость, проницаемость, химическую стойкость, сульфатостойкость, износостойкость и др., что позволяет им длительное время выдерживать техногенным воздействиям. МК – высокореакционный пуццолан, вызывающий эффект упрочнения твердеющей системы. Он связывает известь из раствора интенсивнее, чем другие минеральные добавки – цеолитовый туф, доменный и котельный шлак.

Использование микрокремнезема позволяет получать из рядовых материалов **бетон** с высокими эксплуатационными характеристиками и уникальными конструкционными возможностями:

- стойкость к истиранию;
- уменьшенный до 200–450 кг/м³ расход цемента;
- высокая прочность (прочность на сжатие – 60–80 МПа) и сверхвысокопрочные (прочность на сжатие ν выше 80 МПа) бетоны, в т. ч. мелкозернистые;
- бетоны с высокой ранней прочностью при твердении в нормальных условиях (25–40 МПа в 1 сут.);
- высокоподвижные (ОК = 22–24 см) бетонные смеси повышенной связности – нерасслаиваемости;
- 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 400 °С температур и морозостойкости).

Использование микрокремнезема в сборном бетоне позволяет уменьшить сечения некоторых элементов, облегчая их транспортировку и монтаж. МК обеспечивает более длительную жизнеспособность жидких растворов, облегчает перекачивание смеси, придает коррозионную стойкость. При использовании МК достигаются наивысшие характеристики высокопрочного бетона, легкого бетона, торкретбетона и бетона с пониженной водопроницаемостью.

Химический состав

См. табл. 1.

Таблица 1

Химический состав МК, %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	C	S
	90–92	0,68	0,69	0,85	1,01	0,61	1,23	0,98	0,26

Значение показателя pH водной суспензии МК составляет в среднем – 7,74.
Насыпной вес: 0,17–0,20 т/м³ в неуплотненном состоянии, 0,40–0,70 т/м³ в уплотненном состоянии.
Угол естественного откоса: 75–80 °С в неуплотненном состоянии; 25–30 °С в уплотненном состоянии.

Свойства

Тонкость МК можно проиллюстрировать сравнением с другими порошкообразными материалами:

- микрокремнезем – 140 000–300 000 см²/г;
- золы уноса – 4 000–7 000 см²/г,
- портландцемент – 3 000–4 000 см²/г.

Удельная поверхность по воздухопроницаемости составляет 10–25 тыс. см²/г, что в 3–10 раз превышает аналогичный показатель для цемента.

Технические характеристики

Экономия цемента, высокая пластичность

Введение добавки МК в портландцемент от 10 до 30% от массы цемента увеличивает водопотребность вяжущего по нормальной густоте с 25 до 29%. При этом для равнопластичных бетонных смесей (ОК=Const) сокращается расход цемента до 30%, тогда как такое же количество МК в бетонной смеси того же состава, но при постоянном расходе цемента – увеличивает пластичность по ОК в 4 раза (рис.1). Поэтому по механизму действия и его разжижающего эффекта ультрадисперсный МК следует отнести к добавкам класса суперпластификаторов. Допустимая область применения бетонов с МК при его дозировках до 30% Ц в составе бетона – все бетонные и железобетонные конструкции сооружений жилищно-гражданского и промышленного строительства, включая системы питьевого водоснабжения.

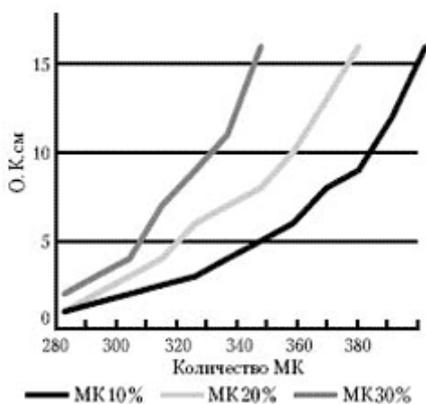


Рис. 1 Влияние МК на пластичность и расход цемента

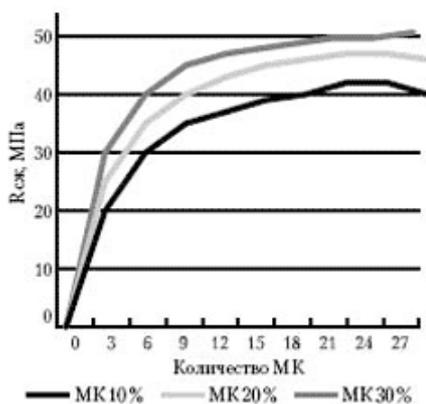


Рис. 2 Кинематика твердения бетона при нормально-влажностных условиях

Применение МК в массовом строительстве также позволяет экономить до 40% цемента без ухудшения характеристик бетона и сокращать расход тепловой энергии при ТВО изделий.

Высокая прочность

Как и все пуццолановые материалы, микрокремнезем вступает в реакцию с гидроокисью кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, освобождаемой при гидратации портландцемента для образования вяжущих соединений. Очень высокая чистота и мелкость МК 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. Степень пуццолановой активности зависит от содержания реактивного кремнезема, но на практике между двумя видами материала с высоким содержанием кремнезема существует довольно незначительное различие. МК может обеспечить 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/mm^2 , а при использовании специальных высокопрочных заполнителей можно достичь прочности 300 N/mm^2 .

Опыт других стран, недавно получивший подтверждение в Великобритании, показал, что 1 кг МК может обеспечивать такую же прочность, как 3–5 кг обычного портландцемента, в смесях одинаковой удобообрабатываемости при умеренном содержании МК и цемента в обеих смесях. На эту вяжущую эффективность, или К-фактор, оказывает влияние содержание обоих материалов, но при содержании обычного портландцемента $200\text{--}300 \text{ кг/м}^3$ и МК – менее 10%, значение К-фактора может составлять около 4.

При добавлении МК в количестве до 30% в сочетании с суперпластификатором можно получить смеси с отношением «вода/вяжущее» ниже 0,3. Такие бетоны могут достигать очень высокой ранней прочности. Они нашли широкое применение там, где осуществляется выдерживание во влажном режиме.

По количеству теплоты, выделяемой при гидратации, МК 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.

Раннее твердение, коррозионная стойкость

Гидравлическая активность МК по показателю пуццоланизации в структуре цементной матрицы более чем в 1,5 раза выше минеральной добавки трепела. Эффективность действия МК весьма показательна для обеспечения повышенной стойкости цементных бетонов в агрессивных средах. По количеству содержания химически связанной воды и степени гидратации портландцемента добавка МК резко ускоряет процесс гидратации на ранней стадии твердения до 7 суток. При В/Ц = Const цементный камень в возрасте 7 суток характеризуется степенью гидратации цемента без добавки по возрасту 28 суток. В этом же соответствии изменяется прочность бетона в два раза как при нормально-влажном твердении, так и при тепловлажностном с температурой 600 °С (рис.2).

В Норвегии и Швеции исследования бетонных конструкций в возрасте до 12 лет показали, что высококачественные бетоны с содержанием МК обладают не меньшей устойчивостью к карбонизации, чем бетоны такой же прочности на обычном портландцементе, и гораздо лучше предотвращают проникновение хлоридов из морской воды. Проведена масса лабораторных измерений коррозии арматуры. Можно с уверенностью сказать, что при условии надлежащего выдерживания, способность бетона с МК защищать стальную арматуру не будет существенно отличаться по сравнению с бетоном той же прочности на обычном портландцементе.

Водонепроницаемость

Эффект заполнения пор, создаваемый пуццолановыми сферическими микрочастицами, способствует значительному уменьшению капиллярной пористости и проницаемости бетона. Фактически непроницаемый бетон можно получить при умеренном содержании МК и сравнительно низком содержании обычного портландцемента. Поскольку МК оказывает большее влияние на проницаемость, чем на прочность, бетон с содержанием МК всегда будет гораздо менее проницаемым, чем бетон эквивалентной прочности на обычном портландцементе. Весьма интересны данные по водонепроницаемости модифицированного цементного раствора как мезоструктуры бетона с добавкой МК до 20% Ц. Марка по водонепроницаемости такого бетона обеспечивается значением W=16.

Трещиностойкость

МК обеспечивает трещиностойкость бетона по показателю $K_{тр} = R_{изг}/R_{сж}$. Эти данные представлены в табл. 2 и на рис.3.

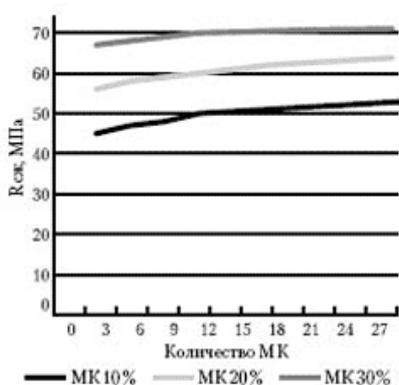


Рис. 3 Кинематика твердения бетона при температуре 60 °С

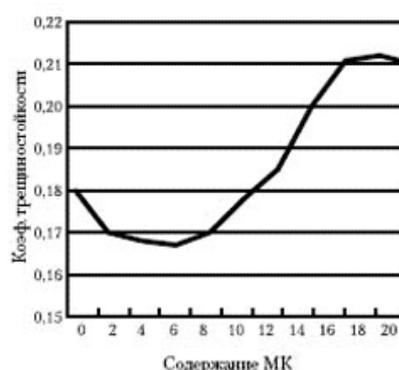


Рис. 4 Кинематика твердения бетона при температуре 60 °С

Из этих данных следует:

1. Введение добавки МК в количестве 15% Ц повышает трещиностойкость бетона в 28 суток в 1,5 раза.
2. С увеличением срока твердения бетона до 90 суток показатель трещиностойкости не изменяется, хотя прочность при изгибе и сжатии существенно увеличивается (см. табл. 2).

Таблица 2

Влияние добавки МК на трещиностойкость мелкозернистого бетона состава 1:2. Возраст 28 суток			
Количество добавки МК, % Ц	Прочность, МПа		Коэффициент трещиностойкости, $K_{tr}=R_{изг}/R_{сж}$
	Изгиб	Сжатие	
0	6,8	38,9	0,175
5	6,5	39,4	0,165
10	7,6	42,7	0,178
15	11,5	58,0	0,21
15	18,4	89,0	0,21

Примечание: возраст бетона 90 суток, при нормально-влажностном твердении

Морозостойкость

Низкая проницаемость и повышенная плотность цементного камня обеспечивает прекрасную морозостойкость бетона с МК. Не существует несовместимости МК с воздухововлекающими добавками, в действительности стабильная реологическая структура пластичного бетона с МК должна уменьшать потерю вовлеченного воздуха при транспортировке и вибрировании.

Повышенная долговечность

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 показали, что по своей потенциальной устойчивости к сульфатам он **равен сульфатостойкому портландцементу**.

Заключение

Таким образом, следует отметить универсальность добавки МК как дисперсии, влияющей на тиксотропные свойства системы, через изменение протяженности структурных элементов – цепочек и их перехода при контактных взаимодействиях в пространственные каркасные ячейки. Это условие соответствует минимальным значениям межфазного натяжения при максимальном развитии граничных поверхностей, что предполагает существование большого числа точечных коагуляционных контактов вплоть до создания предельно наполненной системы, в которой коллективный переход к сцеплению в ближнем порядке вызывает резкое упрочнение. Такой этап гидратообразования с коллоидацией кремнеземных частиц, за счет которых формируются пространственные упаковки, приводит к самоармированию твердеющей цементной системы композита. Локализация дисперсных частиц и энергетика межчастичных связей – надежная гарантия от коррозионного и эрозионного старения бетона и развития его усадочных деформаций. Наоборот, она повышает его прочность и трещиностойкость, а также водонепроницаемость. В целом добавка МК является высокоэффективным модификатором структуры бетона как композиционного материала, полученного на основе наукоемкой технологии.