

А. К. ЛЕВАНОВИЧ

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ХОЛОДНОГО БЕТОНА

Строительные организации в своей практике нередко сокращают в зимнее время объемы каменных и бетонных работ, что приводит к большим убыткам.

Разработанные в Советском Союзе новые прогрессивные методы производства каменных, бетонных и железобетонных работ в зимних условиях, апробированные практикой и научными исследованиями, дают возможность вести эти работы в зимнее морозное время.

Наибольшие трудности в зимний период возникают при проведении бетонных и железобетонных работ. Однако опыт зимнего строительства показывает, что технология зимнего бетонирования методом термоса и электропрогрева полностью обеспечивает приготовление и укладку бетона хорошего, заданного проектом качества. Вместе с тем бетонирование указанными методами нередко приводит к дополнительным экономическим затратам. Так, приготовление кубометра бетона методом термоса, паро- и электропрогрева обходится дороже обычного приготовления на 42—67%.

Отсюда понятна государственная важность разработки технологии зимнего бетонирования. Новым способом зимнего бетонирования является способ «холодного» бетонирования с химическими добавками. Метод холодного бетонирования изучен недостаточно. Не исследовано также влияние добавок на свойства, качество и долговечность бетонных и железобетонных конструкций. Между тем применение холодного бетонирования с дешевыми химическими добавками позволит вести строительство в течение всего года.

Влияние температур на бетон

Процесс получения бетона делится на два периода: схватывание и твердение.

Схватыванием называется начальная стадия процесса, при которой масса бетона переходит из пластического тестообразного состояния в твердое. Последняя стадия процесса—пере-

Ход из твердого состояния в камневидное—называется твердением.

Процесс протекает в результате химических взаимодействий между цементом и водой. Для нормального протекания реакции необходимо, чтобы вода со всех сторон окружала зерна цемента, а это возможно лишь, когда вода в бетонной массе находится в жидком состоянии. Твердое состояние воды (лед) для хода реакции непригодно.

Для нормального твердения бетона необходима теплая и влажная среда с температурой $+15^{\circ}\text{C}$. С понижением температуры процесс твердения замедляется, а с повышением—ускоряется. При нулевой температуре процесс твердения фактически прекращается. Данные, показывающие влияние температуры на прочность бетона (R), приведены на рис. 1.

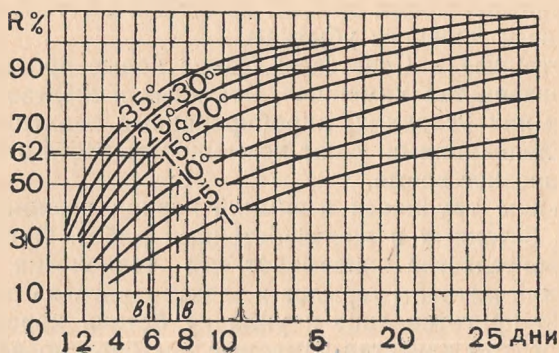


Рис. 1. Твердение бетона на портланд-цементе при температуре от $+1$ до $+35^{\circ}\text{C}$

Различие между условиями твердения бетона летом и зимой в основном сводится к следующему. Бетон, уложенный летом, как правило, имеет температуру, весьма близкую к температуре окружающего воздуха, и в дальнейшем охлаждению не подвергается, а наоборот, даже несколько нагревается за счет тепла, выделяющегося при твердении цемента (экзотермия). Бетон, уложенный зимой, сразу же начинает подвергаться охлаждению. Скорость охлаждения зависит от целого ряда причин: от разности температур уложенного бетона и окружающей среды, от величины охлаждаемой поверхности, от массы уложенного бетона, от теплопроводности опалубки и т. д. В результате охлаждения бетон замерзает и, следовательно, процесс твердения прекращается. При потеплении бетон оттаивает, и процесс твердения снова возобновляется.

Практический интерес представляет вопрос о том, как протекает дальнейшее нарастание механической прочности один раз замороженного бетона.

На основании многочисленных опытов по замораживанию бетона в различные сроки его твердения можно прийти к следующим выводам. Мороз оказывает вредное влияние как на схватывающийся бетон, так и на бетон, находящийся в ранней стадии твердения. Чем старше возраст бетона, т. е. чем больше набранная механическая прочность до первоначального замораживания, тем меньшее влияние оказывает замораживание на последующий после оттаивания процесс твердения. Эта первоначальная так называемая критическая прочность принимается равной 25—30 кг/см².

Однако замораживание бетона при критической прочности не отражается на конечной механической прочности на сжатие, повышает водопроницаемость бетона и уменьшает его плотность.

Структура и прочность инертных материалов, составляющих бетон (песок и щебень), от изменения температуры воздуха, при которой производятся бетонные работы (от -30° до $+50^{\circ}\text{C}$), не нарушается. На цемент такое колебание температуры не оказывает влияния. Твердение же бетона происходит вследствие химического соединения воды с цементом; лед и цемент, как твердые тела, в химическое соединение почти не вступают. Поэтому твердение бетона приостанавливается на все время, пока вода в бетоне находится в твердом состоянии.

При охлаждении бетона скапливающаяся на поверхности щебня влага образует тонкую ледяную прослойку, затрудняет связь между щебнем и растворенным цементом.

Опыт показывает, что из бетона, замерзшего в раннем возрасте и затем нормально твердеющего (при температуре $+15^{\circ}\text{C}$), легко вынимаются зерна гравия, особенно, если они имеют округлую форму. В бетоне же, замерзшем в 5—7-дневном возрасте и затем нормально твердеющем, таких явлений не наблюдается. При оттаивании бетона твердение его возобновляется, но такой бетон теряет некоторую долю своей прочности.

Влияние замораживания в раннем возрасте на прочность бетона наглядно иллюстрируется данными рис. 2.

Низкие температуры отрицательно отражаются на сцеплении стальной арматуры с бетоном. При укладке бетона на холодную арматуру образуется ледяная прослойка между металлом и бетоном, уменьшающая сцепление.

Цементы различных минералогических составов неодинаково влияют на нарастание прочности бетона после замораживания (табл. 1).

Ускорить процесс твердения бетона зимой можно следующими способами: 1) уменьшением количества воды в бетонах; при бетонировании зимой весовое отношение воды к цементу (водоцементный фактор) не должно превышать 0,65; 2) применением цементов повышенной активности, что в зим-

них условиях обеспечивает получение в более короткий срок бетона необходимой прочности; 3) повышением чистоты заполнителей и воды, так как загрязнение песка органическими примесями не только снижает конечную прочность бетона, но и замедляет его твердение, особенно в раннем возрасте; 4) механизированным приготовлением бетона; время перемешивания зимой должно быть увеличено в 1,5—2,0 раза по сравнению с летним периодом; 5) применением вибрации,

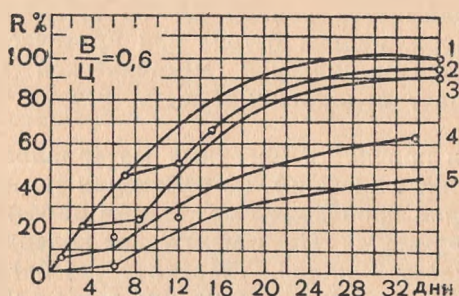


Рис. 2. Кривые прочности бетона при замораживании его в раннем возрасте:

1—бетон незамороженный; 2—бетон замороженный в возрасте 7 дней; 3—в возрасте 3 дней; 4—в возрасте 1 дня; 5—в возрасте 6 час.

так как нарастание прочности жесткого вибрированного бетона происходит быстрее, чем такого же бетона, уложенного штыкованием и трамбованием; 6) введением в бетон химических ускорителей твердения и пластифицирующих добавок.

Первые пять условий, ускоряющие процесс твердения бетона, требуют, чтобы в момент замораживания бетона в нем не содержалось свободной воды (в виде отдельных линз), которая при замерзании и расширении вызывает внутренние напряжения, разрушающие и деформирующие структуру твердеющего бетона.

Таблица 1

Название вяжущего	Возраст замораживания, дни			
	2	3	5	7
Глиноземистый цемент (плавленый)	95—100 ¹	100	100	—
Портланд-цемент марки „500“	85	90	95—100	100
Портланд-цемент марки „300“	70	75—80	85—90	95
Пуццолановый портланд-цемент марки „300“	60	70	80	85
Шлакопортланд-цемент марки „300“	65	75	85	90

¹ Примечание. Везде в процентах от 28-дневной прочности бетона.

На последнем условии основана технология холодного бетонирования в зимних условиях. С одной стороны, нужно подобрать химические вещества, которые понижают точку замерзания воды и этим ускоряют твердение бетона; с другой стороны, необходимо, чтобы эти добавки не снижали положительных свойств бетона при его эксплуатации. Такими добавками являются хлористые соли кальция CaCl_2 и натрия NaCl и другие хлористые соединения. Известно, что малые добавки CaCl_2 и NaCl в бетоны при обычных температурах ускоряют сроки твердения бетона при температурах до -7°C . Но такие добавки солей (2—3% от веса цемента) не обеспечивали незамерзаемость бетонной смеси при более низких температурах. Большие добавки солей нельзя было применять, так как теплые бетонные смеси быстро схватывались в начальный период еще в бетономешалке при перемешивании.

Новый способ приготовления бетона заключается в том, что в неподогретую бетонную смесь вводится значительное количество хлорных солей (лучше всего смеси 50% CaCl_2 + 50% NaCl), которые ускоряют твердение бетона и понижают точки замерзания воды. При этом способе подогрев заполнителей и воды не только не требуется, но в ряде случаев даже недопустим. При сильных морозах необходимо лишь обеспечить температуру укладываемой бетонной смеси не ниже -7°C . Бетонная смесь имеет отрицательную температуру, но не замерзает ввиду нахождения в ней значительного количества понизителей точки замерзания и набирает необходимую прочность. Добавки хлористого натрия, т. е. дешевой поваренной соли, обеспечивают незамерзание бетонных смесей, а комбинация соли с хлористым кальцием обуславливает хорошее твердение на морозе благодаря наличию в бетоне жидкой фазы. Установлено, что зимой твердение протекает не так быстро, как летом. К месячному сроку бетон набирает лишь 60—70% нормальной 28-дневной прочности, а полная марочная прочность достигается только по истечении трех месяцев твердения на морозе. Во многих случаях, особенно при возведении монолитных сооружений, эти сроки приемлемы.

При применении холодного бетона следует обращать внимание на состав бетона и дозировку добавок в зависимости от температуры воздуха в первые 10 дней твердения бетона. Необходимо также учитывать минералогический состав цемента, добавки пластификаторов, концентрацию и дозировку солей, водоцементное отношение, а также условия твердения бетона и гранулометрию его составляющих. Не рекомендуется холодные бетоны готовить на цементе с повышенным содержанием трехкальциевого алюмината и свободной извести. Лучшими цементами являются низко- и среднеалюмосиликатные портланд-цементы марки не ниже «400».

При бетонировании на пуццолановых портланд-цементях и шлакопортланд-цементях необходимо учитывать их замедленное твердение, пониженную плотность и морозостойкость. Удобоукладываемость холодного бетона должна быть такой же, как указано в Технических условиях (ТУ) для обычного бетона, водоцементное отношение—не более 0,6, а при необходимости обеспечить повышенную морозостойкость—не более 0,5. Подбор состава бетонов может производиться любым способом, но при этом следует учитывать, что пластифицирующее действие солей уменьшает потребность в воде примерно на 10%.

Сроки перемешивания смеси рекомендуется увеличить в 1,5—2 раза. Вначале в течение 1,5 мин. перемешивается бетонная смесь с небольшим количеством воды, затем после добавления солевого раствора смесь перемешивается еще 2—3 мин.

В качестве крупных заполнителей для холодных бетонов лучше использовать щебень, чем гравий. Применение гравия понижает прочность бетона на 18—26%. Средняя крупность песка должна быть не менее 0,3—0,35 мм. Применение более мелких песков значительно понижает прочность бетона.

При подборе состава холодного бетона можно пользоваться солевыми добавками определенной концентрации (табл. 2).

Таблица 2

Расчетная отрицательная температура наружного воздуха за первые 10 дней твердения бетона	Концентрация безводных солей, кг на 100 л воды			В % от веса цемента при $\frac{В}{Ц} = 0,5 - 0,6$ смеси
	хлористый кальций	поваренная соль	смесь	
5	6	6	3+3	3—3,5
10	12	12	6+6 или 4+8	6—7,5
15	—	—	6+10 или 8+8	8—10
20	—	—	10+10	10—12

Таблица 3

Для бетона марки „200“ $\frac{В}{Ц} = 0,5 - 0,6$ при отрицательных температурах воздуха	Хлористого кальция, кг	Поваренной соли, кг	Смеси по 50 %
5	10,5—12,5	10,5—12,5	9,5—11,5
10	21,0—26,5	21,0—26,5	20,6—24,5
15	—	—	26,0—30,0
20	—	—	32,0—38,0

При температурах более низких на каждый градус понижения ниже 20° рекомендуется добавлять солей 0,65—0,85% от веса цемента.

Ориентировочный подсчет потребности безводных солей может быть сделан по данным расхода солей на 1 м^3 бетона (табл. 3).

Приготовление водных растворов солей

Для приготовления водного раствора солей нужной концентрации рекомендуется пользоваться концентрированными растворами следующего удельного веса (при 15°C): раствор хлористого кальция—1,29; раствор хлористого натрия—1,15.

Эти растворы могут быть получены заводским путем или растворением безводных твердых солей хлористого кальция (0,427 кг на 1 л воды) и хлористого натрия (0,25 кг на 1 л воды) в лабораторных условиях.

Для ускорения растворения солей рекомендуется подогреть воду, дробить соли и перемешивать раствор.

Составы и особенности твердения бетонной смеси с добавками на морозе

Бетонную смесь с повышенными добавками рекомендуется применять с начальной температурой— 7° — 3°C , регулируя ее температурой компонентов.

Уплотнение бетонной смеси производится тщательным вибрированием. При бетонировании конструкций с арматурой необходим достаточный защитный слой. От его плотности и толщины зависит степень коррозии арматуры. Вслед за укладкой бетонной смеси следует для уменьшения теплопотерь укрыть бетон, применив для этого песок, опилки, торф, снег и т. д., проложить между бетоном и укрытием листовую гидроизоляционный материал. Снятие укрытия может производиться при достижении бетоном не менее 50% марочной прочности.

Изучение влияния химических хлорных добавок на ускорение твердения бетонов имеет весьма важное практическое значение. С этой целью автором были проведены исследования бетонов, приготовленных на цементе марки «400» Волковыского завода. Применялась добавка в виде хлористого кальция от 1 до 12% от веса цемента. Образцы выдерживались в нормальных условиях. Результаты испытаний (рис. 3) показали, что добавки CaCl_2 вызывают значительное повышение прочности бетона во всех возрастах и особенно резкое—в ранние сроки твердения, т. е. в возрасте до 3 суток. Например, при суточном возрасте прочность бетона при добавках

2% от веса цемента составляет 517% от прочности бетона без добавок в эти же сроки; при 3-суточном возрасте—соответственно 173%, 5-суточном—138,4% и при 28-суточном—только 116%.

Применение добавок в количестве, превышающем некоторый предел (около 3% от веса цемента), замедляет нараста-

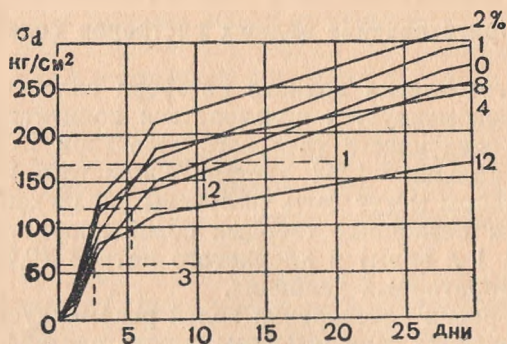


Рис. 3. График влияния добавок хлористого кальция на прочность бетона: 1—распалубка несущих конструкций по ТУ 70% от σ_d ; 2—распалубка плит пролета менее 25 м 50% от σ_d ; 3—распалубка боковых поверхностей по ТУ 25% от σ_d

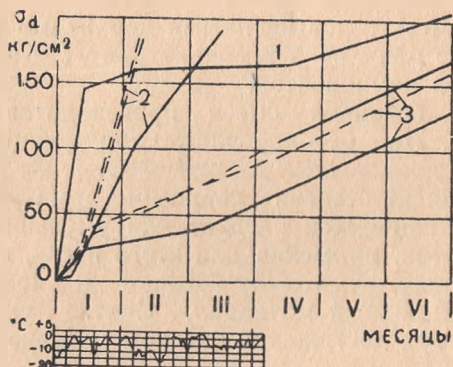


Рис. 4. График нарастания прочности бетона зимой на открытом воздухе (сплошные линии—без добавок; штриховые—с добавкой 2% CaCl_2 ; штрих-пунктирные—с добавкой 4% CaCl_2): 1—при выдерживании в стандартных условиях; 2—при выдерживании в течение 5 суток на морозе и затем в стандартных условиях; 3—при выдерживании на воздухе при температуре по графику

ние относительной прочности, хотя абсолютная прочность продолжает нарастать, а при значительных добавках (около 12%) происходит снижение и абсолютной прочности.

Быстрое нарастание прочности в раннем возрасте при добавках CaCl_2 , по-видимому, объясняется особо благоприят-

ным влиянием добавок на удобоукладываемость и подвижность бетонной смеси, что сказалось на уплотнении при вибрировании образцов.

Нарастание прочности бетона с добавками хлористого кальция при выдерживании его в среде с разной отрицательной температурой характеризуется данными рис. 4.

После нахождения бетона с добавками в течение первых пяти суток на морозе дальнейшее его твердение в нормальных условиях протекает примерно так же, как и у бетонов без добавок, твердеющих в стандартных условиях с отставанием до 18 дней.

Бетоны, твердеющие с января по апрель на открытом воздухе при колебании температур согласно графику от $+5^{\circ}$ до -20°C , с добавками хлористого кальция в количестве 4% от веса цемента дают лучшие показатели, чем с добавками 2%.

Достижение заданной марки бетона, твердеющего на морозе, может быть запроектировано на любой срок в пределах 28—180 дней.

Ввиду отсутствия обоснованных данных о скорости твердения бетона на морозе в зависимости от изменения минералогического состава цемента, дозировки солей и температуры воздуха при проектировании сроков приобретения бетоном заданной марки ориентировочно можно пользоваться следующими показателями (табл. 4).

Таблица 4

7 суток	28 суток	2 м-ца	3 м-ца	6 м-цев
20—30 %	50—60 %	65—80 %	90—100 %	100—120 %

Область применения бетонов, твердеющих на морозе

Бетон с повышенными (более 3% от веса цемента) добавками хлористых солей, твердеющий на морозе, допускается к применению в следующих случаях: а) в бетонных и бутобетонных конструкциях; б) в конструкциях с незначительным процентом армирования (фундаменты зданий и оборудования, подпорные стенки, полы промышленных зданий, дорожное строительство); в) в монолитных железобетонных конструкциях, работающих в постоянных условиях под водой или внутри здания с относительной влажностью не более 60%, рабочей арматурой диаметром не менее 8 мм и защитным слоем 25 мм.

Применение холодного бетона не допускается при высокой меняющейся температуре и влажности, а также в конструкциях с предварительно напряженной арматурой.

На основании исследований, проведенных автором, имеющих литературных данных и значительного опыта, накопленного строительными организациями по применению бетонов, твердеющих на морозе, можно сделать следующие выводы.

1. Благодаря добавкам в бетон солей хлористого натрия и хлористого кальция каждой в отдельности или их смеси бетон твердеет при отрицательных температурах. Интенсивность нарастания прочности на морозе на сжатие у бетонов с добавками происходит с некоторым отставанием против обычных бетонов, твердеющих в нормальных условиях; особо быстрое нарастание прочности наблюдается в первые пять дней.

2. Сцепление бетонов с добавками со стальной арматурой вполне достаточное и колеблется в пределах 8—12% от марочной прочности на сжатие бетона.

3. Коррозия арматуры в бетонах с добавками развивается весьма интенсивно в местах соприкосновения арматуры с воздухом, в неплотных бетонах при наличии раковин и даже мельчайших волосяных трещин и при недостаточной толщине и плотности защитного слоя. При плотных бетонах и толщине защитного слоя не менее 20 мм коррозия стальной арматуры практически отсутствует.

4. Водонепроницаемость и морозостойкость бетонов с добавками менее удовлетворительны, чем обычных бетонов. Уменьшение водоцементного отношения, придание бетону большей плотности путем более тщательного вибрирования, укрытие бетона после его укладки значительно улучшают эти показатели.
