

ЦЕМЕНТАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОМОНОЛИЧИВАНИЯ БЕТОННЫХ ПЛОТИН СО СТОЛБЧАТОЙ РАЗРЕЗКОЙ

Б.Г. Фомин, М.П. Корнюшина

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Показана целесообразность возведения высоких бетонных плотин в суровых климатических условиях с использованием столбчатой разрезки на блоки бетонирования. Отмечена необходимость получения достаточных для проведения цементации раскрытий временных строительных швов. Предложены цементационные материалы, обеспечивающие проведение успешной цементации швов с малыми раскрытиями.

Ключевые слова: бетонная плотина, столбчатая разрезка, строительный шов.

При проектировании и строительстве высоких бетонных плотин необходим всесторонний учет температурных воздействий на них. Особенно важна оценка этих воздействий в строительный период, когда на строящееся сооружение наряду с изменяющейся температурой наружного воздуха оказывает влияние экзотермический разогрев твердеющего бетона и последующее остывание разогретого от процесса экзотермии бетонного массива. Разогрев и остывание массива в условиях зацементирования бетонных блоков и отсутствия свободы температурных деформаций вызывают появление в бетоне температурных напряжений, которые, в свою очередь, могут приводить к появлению трещин, понижающих надежность и долговечность сооружений. Борьбу с трещинообразованием в массивных бетонных гидротехнических сооружениях осуществляют путем проведения соответствующих конструктивных и технологических мероприятий [1].

Конструктивные мероприятия — это прежде всего наиболее рациональная для проектируемого сооружения система разрезки швами. Исследования термонапряженного состояния и анализа технологии возведения массивного бетона позволяют сформулировать следующие основные требования к разрезке тела плотины на блоки бетонирования [2].

1. Система разрезки массивной плотины на блоки постоянными и временными швами, расстояния между швами и высота блоков бетонирования при принятой технологии приготовления и укладки бетона и гарантированном температурном режиме плотины должны обеспечивать трещиностойкость бетона в строительный и эксплуатационный периоды.

2. Расположение швов, их форма и мероприятия по их омоноличиванию должны гарантировать надежную передачу усилий от гидростатического давления, собственного веса и других нагрузок с одной части плотины на другую без уменьшения прочности сооружения.

3. Система разрезки на блоки бетонирования должна быть удобной с производственной точки зрения, т.е. обеспечивать при принятой схеме механизации хорошие условия укладки бетона, давать достаточный фронт работ, обеспечивать удобство и экономичность опалубочных работ; такая система разрезки должна способствовать возможности строительства крупных бетонных сооружений с высокой интенсивностью проведения бетонных работ.

При строительстве высоких бетонных плотин (выше 70—80 м) наиболее полно этим требованиям удовлетворяет столбчатая разрезка, которая обеспечивает в процессе возведения сооружения максимальную свободу температурных деформаций бетонного массива и при прочих равных условиях позволяет сохранить в массиве наиболее благоприятное термонапряженное состояние.

При столбчатой разрезке на блоки бетонирования каждый фрагмент плотины, располагающийся между конструктивными (деформационными) швами, делится на отдельные столбчатые массивы временными строительными швами (рис. 1).

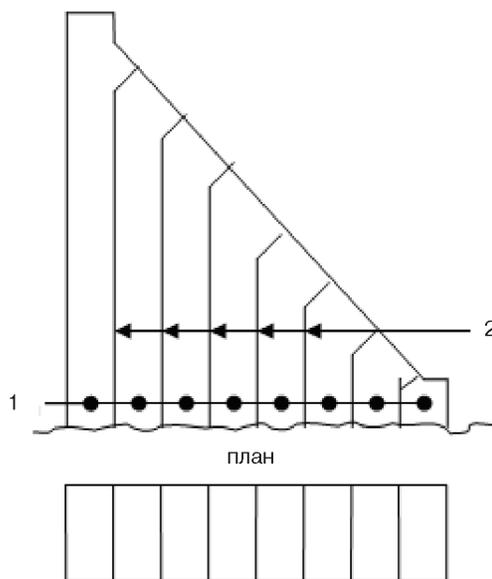


Рис. 1. Бетонная плотина со столбчатой разрезкой
1 — столбы бетонирования; 2 — строительные швы

Строительные швы по существу представляют собой искусственно созданные трещины, в которых локализуются температурные трещины, которые могли бы возникнуть в бетонном массиве. Наличие таких швов существенно уменьшает опасность температурного трещинообразования в бетоне. Бетонирование в каждом столбчатом массиве производится отдельными блоками, площадь основания которых соответствует площади столба, а высота обычно составляет 3 м (хотя в отдельных случаях она может быть от 1,5 до 6 м). При возведении такой плотины существенно уменьшается зависимость условий бетонирования блоков плотины от бетонирования соседних блоков, как это бывает при расположении в плотине блоков вперевязку друг с другом. Это обстоятельство облегчает условия строительства сооружения и позволяет значительно увеличить интенсивность его возведения.

Технологические мероприятия по уменьшению опасности образования температурных трещин заключаются в основном в понижении температуры бетона во время максимума экзотермического разогрева его и в последующий период. Экзотермический разогрев бетона связан с тем, что процесс его твердения происходит с выделением тепла. В условиях, когда возводятся массивные бетонные сооружения с высокой интенсивностью проведения бетонных работ, тепло экзотермического разогрева не успевает рассеиваться. Температура бетона часто поднимается до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и даже выше. При последующем остывании бетона, которое, как правило, приводит к неравномерности распределения температур в массиве, в бетоне возникают растягивающие напряжения, которые часто превосходят допускаемые и приводят к появлению трещин. В связи с этим задача заключается в уменьшении температуры бетона при его твердении. Для этого выполняются следующие мероприятия:

1) ограничивается температура укладываемой бетонной смеси. Для этого производится предварительное охлаждение крупного заполнителя и использование для затворения смеси холодной воды;

2) для приготовления бетона используются специальные цементы, характеризующиеся малым тепловыделением при твердении;

3) в процессе твердения бетона производится отъем тепла из массива путем полива открытых поверхностей бетона холодной водой и искусственное охлаждение его с помощью специальных закладных систем охлаждения;

4) принимаются меры по уменьшению расхода цемента в единице объема бетона.

Для уменьшения опасности температурного трещинообразования целесообразно уменьшать плановые размеры блоков бетонирования.

При остывании бетона происходит сокращение линейных размеров столбчатых массивов, в результате которого временные швы между столбами раскрываются и возведенное сооружение теряет монолитность. В связи с этим возникает необходимость проведения специальных работ по ее восстановлению (омоноличивание плотины). Омоноличивание производится путем проведения цементации швов, при которой полость шва заполняется твердеющим цементным раствором. Цементация производится через специальную систему, которая закладывается в бетон в процессе возведения сооружения. Она выполняется после остывания бетона до температуры омоноличивания, которая устанавливается близкой к температуре сооружения при его эксплуатации.

Чтобы обеспечить совместную работу расположенных рядом столбчатых массивов необходимо осуществить хорошее заполнение шва между ними цементным материалом. Для качественного заполнения шва необходимо, чтобы размер наиболее крупных частиц цемента был таков, чтобы приготовленный цементный раствор свободно проникал в полость шва. При недостаточном раскрытии шва часть его может оказаться незаполненной из-за закупорки его крупными частицами цемента. Следовательно, если при возведении плотины необходимо проводить цементацию швов, проект и производство работ должны быть так согласованы между собой, чтобы было обеспечено устройство швов достаточной ширины для

их надежного заполнения раствором и расположенных так, чтобы они препятствовали образованию промежуточных трещин.

Бюро мелиорации США при строительстве плотин со столбчатой разрезкой на блоки бетонирования и проведении их омоноличивания цементацией строительных швов считало необходимым обеспечивать величину раскрытия швов не менее 0,5 мм [3]. Считалось, что такое раскрытие обеспечит их успешную цементацию. Проведенные в последующем опыты Т. Кеннеди [4] позволили ему сделать вывод о том, что отношение ширины шва к размеру частиц материала в растворе должно быть больше 1,7, а лучшее заполнение будет достигнуто, когда это соотношение больше трех. Э.А. Демьянова на основе анализа опытов Т. Кеннеди показала [5], что минимальное предельное раскрытие трещины a_{\min} , при котором возможно выполнение качественной инъекции, может быть определено по зависимости

$$a_{\min} \geq 5 \cdot d_{95} \cdot 1/\rho,$$

где ρ — показатель шероховатости трещины; d_{95} — диаметр частиц, крупнее которых в составе раствора находится более 5% общего количества его.

В соответствии с этой зависимостью при $d_{95} = 0,08$ мм для гладкой поверхности трещины ($\rho = 1$) $a_{\min} = 0,4$ мм. Для шероховатых трещин предельное значение a_{\min} несколько увеличивается в зависимости от величины абсолютной шероховатости.

В.А. Ашихмен и Л.Э. Пронина на основе исследовательского опыта считают, что степень проницаемости раствора на любом цементе следует определять по наличию крупных частиц, величина которых может составлять 80—100 мк и выше (до 200 мк) [6]. В целом, если проанализировать приведенные результаты исследований, можно сделать вывод, что минимальные раскрытия швов, обеспечивающие успешное заполнение их цементным материалом при использовании обычных цементов заводского помола находятся в пределах 0,4—0,5 мм.

Раскрытие швов при проектировании плотин можно определять по зависимости

$$\delta = \alpha \cdot L \cdot (T_M - T_0), \quad (2)$$

где α — коэффициент линейного расширения бетона; L — длина блока бетонирования в направлении перпендикулярном строительному шву; T_M — температура бетона во время максимума разогрева; T_0 — температура омоноличивания плотины.

Однако натурные наблюдения за раскрытиями швов показали, что их величина, как правило, оказывается существенно меньше рассчитанной по зависимости (2), поэтому был введен понижающий коэффициент K и зависимость (2) приобрела вид

$$\delta = \alpha \cdot L \cdot (T_M - T_0) \cdot K.$$

Значения коэффициента K , определенные по результатам натурных наблюдений, проведенных на различных плотинах составили: по Братской массивной плотине с расширенными швами — 0,5—0,6 [7], по Красноярской массивной плотине — 0,23—0,51 [8], по Андижанской контрфорсной плотине — 0,45 [9].

Следует отметить, что требование обеспечить большее раскрытие межстолбчатого шва находится в некотором противоречии с требованиями по недопущению образования температурных трещин. Как видно из зависимости (2), раскрытие шва увеличивается при увеличении максимальной температуры бетона при его твердении T_M , линейных размеров блоков бетонирования L . В то же время, как говорилось выше, для снижения температурных напряжений необходимо принимать меры по уменьшению плановых размеров блоков и снижению величины температурного разогрева массива.

Коэффициент K — эмпирический, изменяется в широких пределах в зависимости от многих, главным образом, технологических факторов возведения сооружения. После укладки бетона в соседние, образующие шов столбы происходит подъем температуры в массиве, в результате которого в плоскости шва возникают сжимающие напряжения. В процессе остывания бетона их величина уменьшается. После снятия сжимающих напряжений появляются условия для раскрытия шва. Натурные наблюдения, проведенные на строительстве Усть-Ильимской плотины показали, что раскрытие швов начинается после снижения температуры (от максимальной) в среднем на 10—11 °С.

При возведении этой плотины было установлено, что значение коэффициента K существенно зависит от порядка и интенсивности бетонирования сооружения [10].

Величина раскрытия межстолбчатых швов тем больше, чем меньше времени проходит между бетонированием блоков соседних столбов. Эта зависимость представлена на рис. 2. При перерыве в бетонировании соседних столбов менее 30 сут раскрытие шва достигает 1,5—2 мм, при перерыве более 180 сут раскрытие уменьшается до 0,5—0,4 мм. Соответственно изменяется коэффициент K . При перерыве в бетонировании менее 20 сут его значение приближается к 1, а при перерыве свыше 80—90 сут он оказывается меньше 0,3.

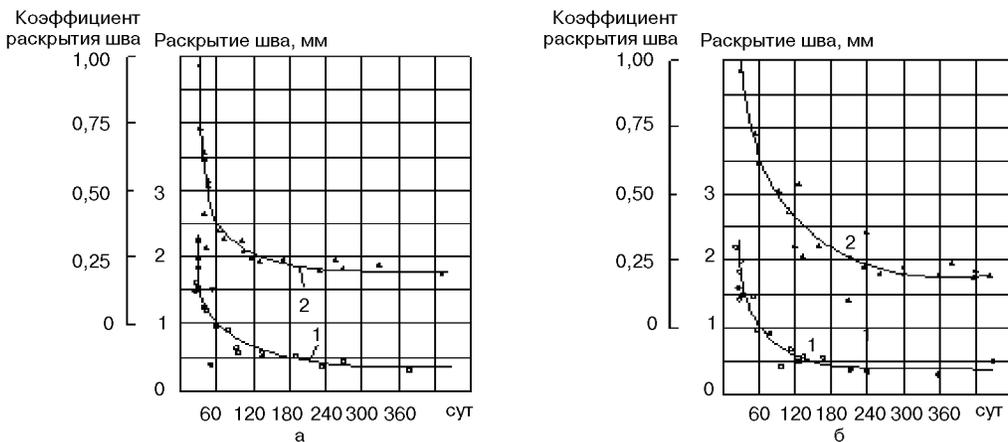


Рис. 2. Зависимость раскрытия межстолбчатых швов от интенсивности бетонирования плотины Усть-Ильимской ГЭС:
 а — зависимость величины раскрытия швов и коэффициента раскрытия от продолжительности в бетонировании соседних столбов; б — зависимость раскрытия швов от интенсивности укладки бетона в столб; 1 — величина раскрытия швов; 2 — коэффициент раскрытия швов

Установлено также, что на значение K влияет регулярность укладки бетона в столб. Увеличение перерыва в бетонировании двух смежных по высоте блоков в пределах одного столба от 3 до 30 сут приводит к уменьшению раскрытия шва от 1,8 до 0,35 мм. Зависимость коэффициента K от регулярности укладки бетона в столб носит такой же характер.

Приведенные данные показывают, что для увеличения раскрытия швов бетонирование соседних столбов и укладку блоков в пределах одного столба следует производить с минимальными перерывами во времени. При соблюдении этого требования величина коэффициента раскрытия шва может быть близкой к единице.

В целом различные схемы возведения сооружения приводят к различным значениям раскрытий швов и, соответственно, к различным условиям проведения цементационных работ. Так, во время строительства плотины Братской ГЭС на р. Ангаре раскрытие швов на время проведения цементации оказалось менее 0,3 мм в 29% и в пределах 0,3—0,5 мм в 13,3% случаев [7]. Швы с раскрытием более 0,5 мм могут быть зацементированы с использованием обычных цементных материалов. В швах с меньшим раскрытием возникает необходимость использования материалов с меньшими размерами фракций. Необходимость цементации тонких трещин и, соответственно, применения тонкодисперсных материалов может возникнуть также в случаях, когда после проведения цементации шва происходит его дополнительное раскрытие. Оно может возникнуть в результате различного рода температурных и усадочных явлений, происходящих с возведенным сооружением. Такое дополнительное раскрытие характеризуется, как правило, малой величиной [11]. В случае появления таких раскрытий также возникает необходимость использования таких специальных материалов.

Такие материалы могут быть получены следующим образом:

- проведением домола цемента на строительной площадке;
- приготовлением цементных растворов в высокоскоростных смесителях;
- обработкой цементных растворов в диспергаторах различных конструкций;
- использованием особо тонкого дисперсного вяжущего (ОТДВ «Микродур»).

Домол цемента на строительной площадке проводится в вибромельницах. При их использовании можно непосредственно на месте работ регулировать степень домола в соответствии с конкретными производственными требованиями [4]. В течение десятиминутного домола можно увеличить удельную поверхность с 2820 до 4765 см²/г. Содержание частиц размером до 20 мкм может быть повышено с 40,7 до 69,6%. Цемент после домола затаривается в мешки из крафт-бумаги и доставляется к растворному узлу. Проникающая способность цементного раствора на вибродомолотом цементе улучшается, но проведение домола является дополнительной технологической операцией, в определенной степени осложняющей производственный процесс. Кроме того, домолотый цемент плохо переносит длительное хранение на растворном узле, где обычно наблюдается повышенная влажность воздуха.

Диспергация цементных зерен может быть проведена путем обработки цементных растворов в различных активаторах, основанных на создании значитель-

ных скоростей перемешивания активируемой системы. Такая обработка приводит также к повышению однородности и нерасслаиваемости раствора. С точки зрения производства цементационных работ указанный способ приготовления прост, эффективен и не требует, в отличие от сухого домола, специальных мер по складированию и хранению высокоактивного цемента. Получаемая при высокоскоростном перемешивании раствора активация частиц цемента приводит к существенному повышению прочности цементного камня.

Повышение проникающей способности цементного раствора может быть успешно осуществлено путем обработки его в гидродинамическом диспергаторе конструкции Гидроспецпроета. Диспергатор размещается в системе транспортирования раствора. Принцип его работы заключается в том, что из расположенного в диспергаторе сопла под высоким давлением выбрасывается струя цементного раствора с высокой скоростью (50—70 м/с). Струя разбивается о преграду. В результате этого гидродинамического воздействия происходит диспергация зерен цемента, приводящая к увеличению удельной поверхности, повышению прочности цементного камня и, главное, к повышению проникающей способности его. Поскольку гидродинамический диспергатор встроен в систему подачи цементного раствора, осложнение технологического процесса происходит в незначительной степени.

Особо тонкодисперсное вяжущее (ОТДВ «Микродур») — это новый материал для проведения инъекционных работ. Он получается в результате сепарации цемента. Процесс сепарации является противоположностью седиментации, причем в качестве среды здесь применяется воздух [5]. Цемент вводится в длинную вертикальную колонку, по которой поднимается воздух с соответствующей скоростью. Частицы, скорость падения которых превышает скорость воздуха, опускаются на дно, а более мелкие уносятся в верхнюю часть колонки и отбираются. Скорость падения частиц цемента плотностью $3,1 \text{ г/см}^3$ в воздухе в зависимости от их диаметра составляет:

| Диаметр частиц, μm | 5 | 10 | 15 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
|-------------------------------|------|-------|------|------|------|-------|------|----|
| Скорость падения см/с | 0,22 | 0,917 | 2,00 | 3,66 | 8,24 | 14,65 | 22,9 | 33 |

Таким образом, с помощью сепарации можно получить материал, в котором исключены частицы диаметром более определенного. Промышленность выпускает четыре основных марки ОТДВ «Микродур», различающиеся по гранулометрическому составу:

X при $D_{95} \leq 6 \mu\text{m}$ (удельная поверхность $24\,000 \text{ см}^2/\text{г}$);

U при $D_{95} \leq 9,5 \mu\text{m}$ (удельная поверхность $16\,000 \text{ см}^2/\text{г}$);

F при $D_{95} \geq 16 \mu\text{m}$ (удельная поверхность $12\,000 \text{ см}^2/\text{г}$);

S при $D_{95} \geq 24 \mu\text{m}$ (удельная поверхность $8000 \text{ см}^2/\text{г}$).

Наглядно сравнить дисперсность ОТДВ «Микродур» и обычного цемента можно на рис. 3.

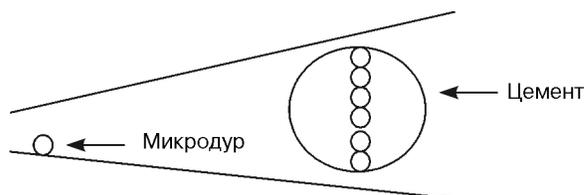


Рис. 3. Дисперсность вяжущего «Микродур» и цемента

Проникающая способность суспензии ОТДВ «Микродур» сопоставима с бездисперсными вяжущими. В результате твердения Микродура получается материал, обладающий высокой прочностью. Разнообразие марок ОТДВ «Микродур» позволяет обеспечить проведение омоноличивания с учетом различных условий по раскрытию швов. Специальная обработка препятствует агломерации частиц вяжущего при хранении. Поэтому требования к условиям его хранения менее жесткие, чем, например, для вибромолотого цемента. Гарантийный срок хранения ОТДВ «Микродур» обычно составляет 6 месяцев. Необходимо отметить, что условия его изготовления полностью гарантируют отсутствие в нем частиц выше определенного размера, в то время как в предыдущих способах диспергации возможно сохранение крупных частиц, которые при помоле и диспергации не поддаются измельчению из-за высокой прочности материала.

Достоинства материала ОТДВ «Микродур» делают его весьма перспективным для использования в работах по омоноличиванию бетонных плотин. Сравнительно высокая стоимость материала вполне компенсируется его положительными свойствами, приводящими к повышению качества работ и улучшающими их технологию.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [2] Македонский Г.М., Матвеев Б.П. и др. Разрезка массивных бетонных сооружений на блоки бетоноирования. — М.: Энергия, 1969.
- [3] Concrete Manual. A Manual for the Control of Concrete Construction (USA). Sixth Edition. — 1955. — P. 432.
- [4] Kennedy T.V. Pressure grouting fine fissures // Soil mechanics and foundation division. — 1958. — Vol. 84. SMS. 1958. — P. 1731—1735.
- [5] Демьянова Э.А. К вопросу определения минимального размера трещин, поддающихся цементации: Труды ВНИИ ВОДГЕО. — 1971. — Вып. 31.
- [6] Ашихмен В.А., Пронина Л.Э. Исследования проникаемости цементного раствора в полости малого раскрытия // Гидротехническое строительство. — 2001. — № 8.
- [7] Эйдельман С.Я. Натурные исследования плотины Братской ГЭС. — Л.: Энергия, 1968.
- [8] Епифанов А.П., Сильницкий В.И. Обеспечение условий для хорошего качества цементации строительных швов массивных бетонных плотин // Энергетическое строительство. — 1972. — № 5. — С. 68—70.
- [9] Абрамов Л.И., Казарновский В.А., Шрейдер А.К. Расчет раскрытия межстолбчатых швов массивно-контрфорсных плотин. — М.: Энергия, 1974.
- [10] Кайданов Г.Л., Фомин Б.Г., Фрейдман Ф.Б. Создание условий раскрытия межстолбчатых швов и омоноличивание плотины Усть-Илимской ГЭС // Энергетическое строительство. — 1976. — № 3. — С. 42—49.

- [11] *Аргал Э.С.* Омоноличивание бетонных плотин цементацией строительных швов. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
- [12] *Адамович А.Н.* Закрепление грунтов и противофильтрационные завесы. — М.: Энергия, 1980.
- [13] *Ли Ф.М.* Химия цемента и бетона. — М.: Госстройиздат, 1961.

CEMENTIC MATERIALS FOR CEMENTATION CONCRETE DAMS CUTTING ON COLUMNS

B. Fomin, M. Kornushina

Peoples' Friendship University of Russia
Mikluho-Maklaja str., 6, Moscow, Russia, 117198

The expediency of erection of high concrete dams cutting on columns in severe climatic conditions with use cutting on columns on concreting blocks is shown. Necessity of reception sufficient for carrying out of cementation of disclosings of time building joints is noted. Are offered cementic materials providing carrying out of successful cementation of seams with small disclosings.

Key words: cutting on columns, cementation, joint.