

УДК 691.32

**ТОРКРЕТ-БЕТОН – СОВРЕМЕННЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ  
СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ КОТОРОГО  
ИСПОЛЬЗОВАНО МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

**В.Я.Бабиченко, С.В.Кирилюк, А.В.Дудник, Л.А.Черепашук,  
О.А.Поддубный**

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*

Понятие торкрет-бетон существует давно и включает в себя название строительного материала, способа бетонирования и метода строительства [1].

Торкрет-бетон как строительный материал является обычным бетоном. Этот бетон отличается только способом изготовления. Торкрет-бетон также широко применяют для ремонта и усиления существующих сооружений и конструкций из бетона и железобетона.

Торкрет-бетон как способ бетонирования представляет собой бетонную смесь, которую подают к месту производства работ по закрытым, выдерживающим повышенное давление трубопроводам и наносят путем разбрызгивания. В строительстве для транспортирования смеси в основном используют шланги.

Торкрет-бетон как способ строительства целесообразен при производстве бетонных работ: при незначительной (до 10 см) толщине конструкций и большом модуле поверхности; плавном изменении внутренних сечений конструкций; криволинейных пространственных конструкциях переменного сечения (наклонные поверхности). При этом свежий торкрет-бетон при нанесении на стены или на потолочные поверхности не должен оползать или обваливаться, поэтому необходимо обеспечить хорошее сцепление между слоями свеженанесенной бетонной смеси (когезия) и нанесение торкрет-бетона тонкими слоями с учетом влияния собственной массы без образования рабочих швов. Чтобы обеспечить хорошее сцепление торкрет-бетона с поверхностями, на которые наносят смесь, необходима их предварительная обработка [1].

Исходными материалами для торкрет-бетона являются цементы, вода и заполнитель, а также в определенных случаях добавки в бетон, а также стальные или минеральные, или полимерные волокна.

Технология торкретирования предусматривает использование в

основном двух видов торкрет-бетона: сухой с сухой исходной смесью и мокрый торкрет-бетон с влажной исходной смесью.

Нами для исследования принят способ мокрого торкрет-бетона, как наиболее интенсивно развивающийся во всех странах, и в том числе на Украине, и с использованием математического моделирования которого выполнена оптимизация состава, структуры и свойств бетона, уложенного по технологии торкретирования.

При мокром способе торкретирования влажная смесь подается в трубопровод и транспортируется либо потоком с низкой концентрацией, либо сплошным потоком. При мокром способе с подачей потоком с низкой концентрацией подают влажную смесь к трубопроводу, по которому она с помощью сжатого воздуха попадает в струенаправляющую трубу. При мокром способе торкретирования с подачей материала сплошным потоком влажная смесь транспортируется по трубопроводам к распылительному соплу, где сплошной поток материала под действием движущегося воздуха превращается в поток с низкой концентрацией материала с повышенной скоростью движения [1].

Области применения торкрет-бетона предусматривают конструкционное и не конструкционное использование. Конструкционное использование:

- строительство резервуаров, емкостей, башен, в том числе питьевого водоснабжения;
- гидроизоляция гидротехнических сооружений, туннелей и коллекторов;
- строительство элементов гидротехнических сооружений;
- реконструкция железнодорожных и автомобильных туннелей;
- окончательная отделка штолен, туннелей, пещер, шахт;
- нанесение поверхностных покрытий в штольнях и безнапорных водоводах с целью улучшения протекания жидкости;
- крепление строительных котлованов;
- крепление скальных стен и откосов;
- подведение контропор и фундаментов под сооружения;
- обделка и поверхностные покрытия при надземном строительстве;
- усиление конструкций из кладки и бетона;
- усиление стальных конструкций.

Не конструктивное использование:

- предупредительный ремонт, восстановление и защита зданий и сооружений;
- защитные работы в подземных сооружениях;

- огнеупорная облицовка;
- антикоррозионная защита стальных конструкций;
- восстановление защитного слоя бетона;
- нанесение износостойчивых покрытий;
- восстановление профилей;
- ремонт повреждений, вызванных износом, кислотами, газами, огнем, взрывами, морозами и чрезмерной нагрузкой;
- реконструкция армированных перекрытий;
- устранение дефектов строительства бетонных сооружений;
- ремонт туннельных покрытий и обделок;
- ремонт мостов и подпорных стен;
- ремонт гидротехнических сооружений [2].

В процессе укладки торкрет-бетона на поверхность бетонной конструкции склеивающим материалом между торкрет-бетоном и основным бетоном является цементное тесто торкрет-бетона. При этом важно, чтобы цементное тесто торкрет-бетона в момент укладки обладало наиболее низким В/Ц и заполняло все поры и неровности на поверхности основного бетона.

По экспериментальным данным в начальный момент процесса укладки торкрет-бетона на вертикальной поверхности способны удержаться только самые мелкие в основном цементные частицы смоченные водой (рис. 1).

При ударе частицы цемента укладываемого торкрет-бетона о бетонируемую поверхность вода, смачивающая частицу, частично стекает с нее и смачивает бетонируемую поверхность, прижимая к ней частицу и противодействуя обратному движению ее после удара, частично удерживается на поверхности частицы в виде тонкого адсорбционного граничного слоя. При соприкосновении частицы цемента с бетонируемой поверхностью помимо поверхностного натяжения воды на частицу начинают действовать Ван-дер-ваальсовы силы. Проявление этих сил обусловлено наличием на поверхности любого твердого тела ненасыщенных силовых полей и возможно на расстоянии порядка  $10^{-3} - 10^{-4}$  см [3].

Ударившись о поверхность, смоченная водой частица цемента торкрет-бетона, имея определенный запас кинетической энергии, движется к поверхности бетонирования в слое воды до того момента, пока ее движению не начинает препятствовать тонкий граничный слой в зазоре между частицей и поверхностью (рис. 1).

Как известно, механические свойства жидкости в объеме и тонком слое различны. Каждая жидкость характеризуется предельной толщиной слоя, с дальнейшим уменьшением которого жидкость

переходит в квазитвердое или квазикристаллическое состояние. Толщина адсорбционного, или граничного, слоя воды на гидрофильной поверхности цементной частицы примерно равна  $10^{-5}$  см. Граничный адсорбционный слой на поверхности частиц обуславливает появление отталкивающих сил в зазоре между частицей торкрет-бетона и бетонируемой поверхностью и препятствует уменьшению зазора между ними менее  $10^{-5}$  см [3].

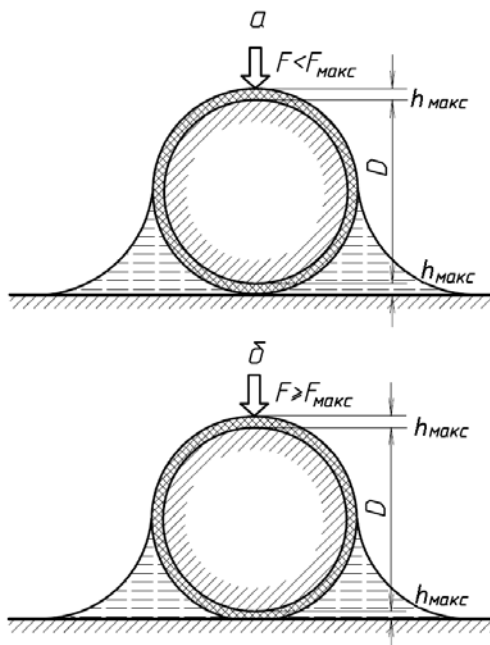


Рис. 1. Взаимодействие частиц цемента торкрет-бетона с бетонной поверхностью: а) внешняя прижимающая сила, действующая на частицу, не превышает величины верхнего барьера; б) внешняя прижимающая сила равна или более величины верхнего силового барьера

Величина сил отталкивания определяется расклинивающим давлением ( $F_{раскл}$ ) тонкого граничного слоя жидкости на поверхности частицы:

$$F_{раскл} = \frac{2\pi r \cdot A}{n-1} \cdot (h_{мин}^{-n+1} - h_{макс}^{-n+1}), \quad (1)$$

где  $r$  – радиус частицы, см;  $A$  – константа Ван-дер-Ваальса, равная

$6,10^{-14}$  эрг;  $n = 3$ ;  $h_{\max}$  – толщина адсорбционного граничного слоя жидкости на поверхности частицы, равная,  $10^{-5}$  см;  $h_{\min}$  – величина зазора или минимальная толщина слоя жидкости между частицей цемента в торкрет-бетоне и бетонируемой поверхностью, при которой приостанавливается приближение частицы цемента к поверхности бетонирования вследствие нарастания сил упругого отталкивания, равная,  $10^{-7}$  см.

Дальнейшему сближению частиц с поверхностью или друг с другом препятствует силовой барьер ( $F_{\max}$ ) (рис. 2) [3].

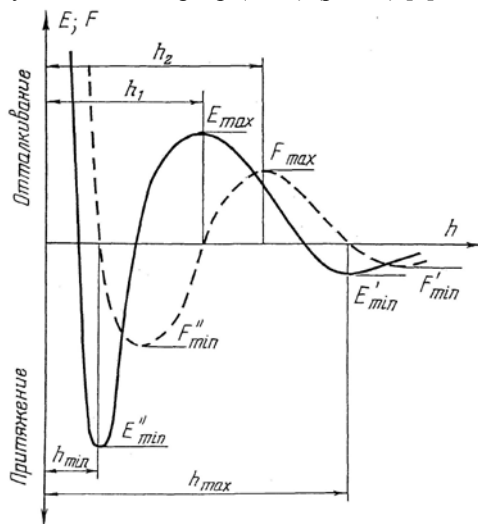


Рис. 2. Силовая диаграмма взаимодействия тонкодисперсной частицы цемента торкрет-бетона с бетонной поверхностью [3]:  $E$  – кинетическая энергия, которой обладают дисперсные частицы цемента торкрет-бетона в процессе набрызга;  $F$  – отталкивающая сила, действующая между дисперсными частицами цемента торкрет-бетона и бетонируемой поверхностью;  $h$  – расстояние между дисперсными частицами цемента торкрет-бетона и бетонируемой поверхностью

Если величина внешней прижимающей силы, действующей на частицы, достигает величины верхнего силового барьера или превысит его ( $F \geq F_{\max}$ ), то произойдет самопроизвольное приближение частицы к поверхности другого твердого тела на величину  $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$ , соответствующую расстоянию вдоль координаты  $F_{\max}$  до  $F_{\min}$ , характеризующую уже силы упругого отталкивания.

В начале  $F \geq F_{\max}$  частица как бы попадает в “молекулярную ловушку”, обеспечивающую появление молекулярного сцепления,

создающего прочность системы на разрыв.

Фиксация частицы при этом происходит на минимально возможном расстоянии:  $h_{мин} \approx 10^{-7}$  см (рис. 1).

По данным ряда исследователей при фиксации частиц на различных расстояниях сила прилипания этих частиц, обуславливающая дальнейшую прочность контакта, различна. Относительную величину силы прилипания частиц цемента, смоченных водой, при фиксации их на различных расстояниях от бетонируемой поверхности с некоторым приближением можно характеризовать отношением:

$$\frac{h_{макс}}{h_{мин}} = \frac{F_{мин}^I}{F_{мин}^{II}}, \quad (2)$$

где  $F_{мин}^I$  – сила прилипания в случае, когда внешняя прижимающая сила  $F < F_{макс}$ ;  $F_{мин}^{II}$  – сила прилипания в случае, когда  $F \geq F_{макс}$ .

В ряде работ обращается внимание на тот факт, что при наличии химического средства между контактирующими телами, сближенными на расстояние порядка  $10^{-7}$  см, возможно возникновение “сил химических связей”, способствующих соединению этих тел в единое целое.

Подставив в формулу (1) необходимые данные проанализируем, достаточна ли внешняя прижимная сила, действующая на частицы цемента при торкретировании, для преодоления максимального расклинивающего давления граничного слоя воды ( $F_{макс}$ ) и приближения частицы на максимально возможное расстояние ( $h_{мин}$ ) порядка  $10^{-7}$  см. При этом необходимо выяснить, при каких параметрах торкретирования внешняя прижимающая сила превысит расклеивающее давление граничного слоя воды на поверхности цементной частицы торкрет-бетона ( $F > F_{макс}$ ), когда могут быть созданы необходимые условия для максимальной силы прилипания цементного теста торкрет-бетона к поверхности основного бетона.

$F_{макс}$  определяем по формуле (1), при этом  $h_{макс} = 10^{-5}$  см и  $h_{мин} = 10^{-7}$  см. Расчетные данные процесса смачивания показывают, что при торкретировании при начальной скорости струи торкрета на выходе из сопла, равной 70–90 м/с,  $F > F_{макс}$ .

### **Выводы**

Таким образом, в процессе укладки торкрет-бетона создаются

необходимые условия для приближения частиц цемента торкрет-бетона к поверхности основного бетона на минимально возможное расстояние  $h_{мин}$  порядка  $10^{-7}$  см, чем достигается монолитное соединение торкрет-бетона с поверхностью основного бетона.

С учетом технологических особенностей торкретирования нами использовано математическое моделирование, позволившее при заданных параметрах набрызга и результатах экспериментальных исследований получить необходимые данные по оптимизации состава, структуры и свойств торкрет-бетона [4].

### **Summary**

**Shotcrete, as well as fine-grained concrete is a composite material with enhanced qualities of strength and density, in order to optimize the composition, structure and properties of which used mathematical modeling.**

### *Литература*

1. Брукс Г. Торкрет-бетон, торкрет-цемент, торкрет-штукатурка / Г. Брукс, Р. Линдер, Г. Руфферт; пер. с нем. М.В. Алешкиной, З.А. Липкинда; ред. Л.А. Феднер. – М.: Стройиздат, 1985. – 205 с.
2. ТУ 5745-001-16216892-06. Торкрет-бетон – М. : ЗАО «Служба защиты сооружений», 2006. – 12 с.
3. Полак А.Ф. Твердение минеральных вяжущих веществ (вопросы теории) / А.Ф. Полак, В.В. Бабков, Е.П. Андреева. - Уфа: Башкирское книжное издательство, 1990. – 215 с.
4. Вознесенский В. А. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ / Вознесенский В. А., Ляшенко Т. В., Огарков Б. Л. – К.: Высшая школа, 1989. – 328 с.