

УДК 622.281.4:693.546.3

А.В. Корчак, А.В. Гончаров

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АДГЕЗИИ ПРИ НАБРЫЗГ-БЕТОНИРОВАНИИ В ПОДЗЕМНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Предложена методика аналитической оценки капиллярной и электростатической составляющих адгезии при набрызг-бетонировании в подземном строительстве.

Ключевые слова: набрызг-бетонирование, адгезия, цемент.

A.V. Korchak, A.V. Goncharov
THE ESTIMATION OF ADHERENCE PARAMETERS DURING THE PLASTER BASE CONCRETE CASTING IN THE UNDERGROUND CONSTRUCTIONS

The method for the analytical evaluating filamentous and electrostatic components of adherence during the plaster base concrete casting in the underground constructions

Key words: plaster base concrete casting, adherence, concrete.

Технология набрызг-бетонирования широко применяется для крепления подземных выработок, пройденных в скальных породах, а также для гидроизоляции и сонации городских подземных сооружений. Набрызг-бетон обладает более высокими по сравнению с обычным бетоном прочностными свойствами (в $2,5 \div 2,75$ раза на сжатие и $1,4 \div 1,5$ раза на растяжение).

При всех достоинствах набрызг-бетонирования эта технология обладает существенным недостатком: потери материала при «отскоке» достигают до 30%. Это обусловлено недостаточной для предотвращения явления «отскока» величиной начальной адгезии бетона при набрызг-бетонировании.

Для разработки научно – обоснованных рекомендаций по увеличению начальной адгезии при набрызг-бето-

нировании необходимо оценить механизм и параметры адгезии бетона в момент его нанесения и в момент его окончательного застывания.

Зная механизм и параметры адгезии бетона и факторы, влияющие на них, можно разработать рекомендации по управлению этими факторами с целью увеличения адгезии.

Адгезия при набрызг-бетонировании зависит главным образом от параметров цемента (его минерального состава, дисперсности частиц, распределения по грансоставу). Условимся называть поверхность, на которую наносится набрызг-бетон «подложной».

Адгезионное взаимодействие цементных частиц сырого бетона с поверхностью подложки будет обусловлено капиллярными и электростатическими силами. В начальный момент нанесения бетона на поверхность подложки, из-за высокого содержания воды в бетоне, величина жидкостного зазора (жидкостной манжеты) между цементными частицами бетона и поверхностью подложки будет максимальна и примерно равна толщине слоя физически связанной воды. По мере застывания бетона величина этого зазора будет стремиться к толщине сухого зазора. В связи с этим, по мере высыхания, капиллярная составляющая адгезии будет уменьшаться, а

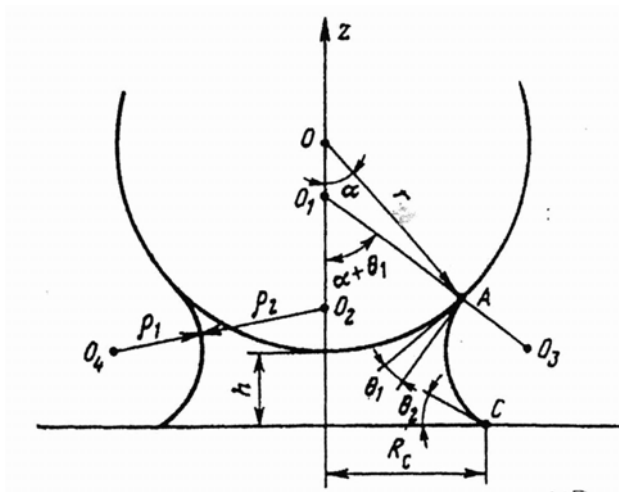


Схема взаимодействия минеральной частицы цемента с плоской твердой поверхностью подложки при наличии жидкой фазы между ними: θ_1 - краевой угол смачивания цементной частицы; θ_2 - краевой угол смачивания поверхности подложки; r - радиус цементной частицы; ρ_1 - первый главный радиус кривизны жидкостной манжеты, это радиус кривизны жидкостной манжеты в произвольной ее точке, он находится в плоскости листа; ρ_2 - второй главный радиус кривизны жидкостной манжеты

в этой же точке, он находится в плоскости перпендикулярном листу; R_c - радиус смачивания поверхности подложки жидкостной манжетой; h - толщина жидкостной манжеты; α - угол

электростатическая составляющая увеличиваться.

Сделаем оценку капиллярной составляющей адгезионного взаимодействия отдельной цементной частицы с плоской поверхностью подложки. Представим, что цементная частица имеет сферическую форму. Схема взаимодействия такой частицы с плоской поверхностью через слой жидкости толщиной h представлена на рисунке.

Чисто феноменологически, капиллярная составляющая адгезии цементной частицы к плоской поверхности подложки согласно рисунку равна

$$F_k = 2\pi R_c \sigma + \pi r^2 \cdot P_k; \quad (1)$$

где σ - поверхностное натяжение воды, $\sigma = 72,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м; R_c - радиус смачивания подложки жидкостной манжетой, м; ρ_2 - второй главный радиус кривизны жидкостной манжеты, м; P_k - капиллярное давление, Па;

$$P_k = \sigma \left(\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2} \right). \quad (2)$$

Первое слагаемое в формуле (1) характеризует капиллярную составляющую адгезии, обусловленную по-

верхностным натяжением жидкости по периметру смачивания R_c . Второе слагаемое характеризует капиллярную составляющую адгезии, обусловленную капиллярным давлением по пятну смачивания.

Выражение (1) не позволяет сделать количественную оценку капиллярной составляющей силы адгезии цементной частицы к плоской поверхности подложки.

Для количественной оценки этой составляющей силы адгезии воспользуемся функциональной зависимостью, полученной в работе [1]. Эта зависимость имеет вид:

$$F_k = \frac{\pi \gamma \sigma (2\kappa_1 \cdot \kappa_3 + \kappa_2^2 - \kappa_1 \cdot \kappa_2)}{\kappa_1} \quad (3)$$

$$\text{где } \kappa_1 = \frac{1 - \cos \alpha}{\cos \alpha + \cos \theta_2};$$

$$\kappa_2 = \frac{\sin \alpha (1 + \cos \theta_2) - (1 - \cos \alpha)}{\cos \alpha + \cos \theta_2};$$

$$\kappa_3 = \frac{\sin \alpha (1 + \cos \theta_2) - \sin \theta_2 (1 - \cos \alpha)}{\cos \alpha + \cos \theta_2}$$

Если поверхность подложки считать полностью смачиваемой, что

вполне справедливо, то угол $\theta_2 \rightarrow 0$. В этом случае величины κ_1 , κ_2 и κ_3 будут равны:

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= tg^2 \frac{\alpha}{2}; \quad \kappa_2 = 2tg \frac{\alpha}{2} - tg^2 \frac{\alpha}{2}; \\ \kappa_3 &= 2tg \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом (4) выражение (3) примет вид:

$$F_k = 2\pi r \sigma (tg^2 \frac{\alpha}{2} - tg \frac{\alpha}{2} + 2) \quad (5)$$

Исследовав функцию стоящую в скобках в выражении (5) на экстремум, можно определить максимальное значение величины F_k .

Максимальное значение F_k будет в том случае, когда $\alpha = 0$ или $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

При этом выражение в скобках формулы (5) будет равно 2, а капиллярная составляющая адгезии цементной частицы к поверхности подложки будет равна:

$$F_k = 4\pi r \sigma \quad (6)$$

Подставляя в (6) значения $\sigma = 72,5 \cdot 10^{-3}$ Н/м и $r = 2,5 \cdot 10^{-5}$ получим $F_k = 4 \cdot 3,14 \cdot 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 72,5 \cdot 10^{-3} = 2,2765 \cdot 10^{-5}$, Н

Максимальная величина капиллярной составляющей адгезии A_k при этом будет равна

$$A_k = \frac{F_k}{\pi r^2} = \frac{2,2765 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 6,25 \cdot 10^{-10}} = 0,116 \cdot 10^5, \text{ Па} \quad (7)$$

В процессе застывания бетона толщина жидкостной манжеты h (рисунок) будет уменьшаться стремясь к толщине сухого зазора между цементной частицей и подложкой. При этом капиллярная составляющая адгезии цементной частицы к поверхности подложки будет стремиться к нулю, а электростатическая составляющая - возрастать.

Величину электростатической составляющей силы адгезии F_3 цемент-

ной частицы к поверхности подложки можно оценить, воспользовавшись известным выражением из [2].

$$F_3 = \frac{4}{3} \pi \frac{Br}{h^3}, \quad (8)$$

где B - константа, $B = 10^{-28}$ Н·м²; r - радиус цементной частицы, $r \approx 2,5 \cdot 10^{-5}$ м; h - зазор между цементной частицей и поверхностью подложки; величина этого зазора при высыхании бетона равна толщине зазора при сухом контакте, который равен $h_c \approx 1,3 \cdot 10^{-10}$ м.

Подставляя приведенные численные значения в (8), получим электростатическую составляющую силы адгезионного взаимодействия цементной частицы с поверхностью подложки

$$F_3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot \frac{10^{-28} \cdot 2,5 \cdot 10^{-5}}{(1,3 \cdot 10^{-10})^3} = 4,764 \cdot 10^{-3}, \text{ Н}$$

Если отнести полученную силу к Миделевому сечению частицы (Миделево сечение частицы - это ее проекция на контактирующую поверхность), то получим электростатическую составляющую адгезии A_3 к поверхности подложки при высыхании бетона.

$$\begin{aligned} A_3 &= \frac{F_3}{\pi r^2} = \\ &= \frac{4,764 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 6,25 \cdot 10^{-10}} = 24,275 \cdot 10^5, \text{ Па} \quad (9) \end{aligned}$$

В момент нанесения бетона на поверхность подложки толщина водного зазора между этой поверхностью и частицей цемента будет равна толщине пленки физической связи воды, это примерно $h \approx 5 \cdot 10^{-7}$ м.

В этом случае сила электростатического взаимодействия согласно (8) будет равна

$$F'_3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot \frac{10^{-28} \cdot 2,5 \cdot 10^{-5}}{125 \cdot 10^{-21}} = 83,73 \cdot 10^{-5}, \text{ Н};$$

а величина электростатической составляющей адгезии

$$A'_3 = \frac{F'_3}{\pi r^2} = \frac{83,73 \cdot 10^{-5}}{3,14 \cdot 6,25 \cdot 10^{-10}} = 4,26 \cdot 10^5, \text{ Па} \quad (10)$$

По мере высыхания бетона электростатическая составляющая адгезии будет увеличиваться от A'_3 до A_3 , т.е. с $4,26 \cdot 10^5$ Па до $24,275 \cdot 10^5$ Па.

Из вышеизложенного следует, что в момент нанесения бетона на подложку при набрызг-бетонировании суммарная адгезии будет складываться из капиллярной составляющей адгезии (7) и электростатической (10), т.е.

$$A = A_k + A'_3 = 0,116 \cdot 10^5 + 4,26 \cdot 10^5 = 4,376 \cdot 10^5 \text{ Па} \quad (11)$$

При высыхании бетона адгезия его к подложке будет определяться только электростатической составляющей (9),

$$A = A_3 = 24,275 \cdot 10^5 \text{ Па} \quad (12)$$

Анализируя выражения (6) и (7) можно прийти к выводу, что капиллярная составляющая адгезии пропорциональна поверхностному натяжению воды (σ) и обратно пропорциональна радиусу (r) цементных частиц.

Анализ выражений (8) и (9) показывает, что электростатическая составляющая адгезии обратно пропорциональна кубу толщины жидкостной манжеты (h^3) и радиусу (r) цементных частиц.

Толщина (h) жидкостной манжеты есть величина постоянная, равная примерно толщине плёнки физически связанной воды на поверхности цементной частицы.

Управляемыми аргументами с целью увеличения адгезии при набрызг-бетонировании являются поверхностное натяжение воды (σ) и размер цементных частиц (r).

Обоими этими параметрами возможно управлять (увеличивать поверхностное натяжение воды и уменьшать размер цементных частиц путем их частичного дезинтегрирования) при импульсной магнитно-импульсной обработке бетона при набрызг-бетонировании. Это конструктивно и технологически сравнительно просто можно осуществить в потоке непосредственно перед нанесением бетона на укрепляемую поверхность.

Так в работе [3] показано, что прочность пескоцементных смесей при их магнитно-импульсной обработке с определенными электромагнитными параметрами увеличивается после их застывания на 28-е сутки на 20÷25%. При этом осадка конуса растекания бетона при его нанесении на подложку уменьшается на 40÷45%, что свидетельствует об увеличении адгезии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дугарцыренов А.В. Кандидатская диссертация «Исследование адгезионных процессов при транспортировании связанных пород», – М.: МГИ, 1978.
2. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. 3-е издание. – М., 1973.
3. Гончаров А.В. Экспериментальная оценка влияния магнитно-импульсной обработки цемента на прочность образцов пескоцементной смеси. Горный информационно-аналитический бюллетень, № 5, 2007, с. 77-80. **ГИАБ**

Коротко об авторах

Корчак А.В. – профессор, доктор технических наук, ректор Московского государственного горного университета, ud@msmu.ru
 Гончаров А.В. – аспирант Московского государственного горного университета, ud@msmu.ru