

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ПРИ ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

Шведов А.П., канд. техн. наук, доцент
(Полоцкий государственный университет)

Аннотация. Для повышения прочности бетона широко используются воздействия на бетонные смеси различных полей особенно электрических. Приложенное электрическое поле приводит в движения образующиеся в процессе гидратации ионы. Бетонная смесь, в отличие от типичных электролитов, имеет в своём составе заряженные цементные частицы, которые изменяют силы воздействия на ионы от прилагаемого электрического поля. Поэтому при разработке методов электроактивации необходимо отрабатывать режимы с учётом внутренних электрических полей и их изменения во времени.

Одним из вариантов повышения прочности бетона и ускорения твердения может быть использование добавок готовых центров кристаллизации. Наиболее эффективным является применение затравок, являющихся кристаллохимическими аналогами продуктам гидратации цемента. Идентичными могут быть продукты, получаемые в условиях гидратации цемента бетонной смеси. Обеспечить соответствующие условия можно при двустадийном вводе цемента в процессе приготовления бетонной смеси, а именно первая часть вводится совместно с заполнителями, а вторая – в виде активированной суспензии с водой затворения. При этом суспензию необходимо использовать как среду для образования активных затравок.

С учетом того, что на поверхности цементных частиц после затворения цемента водой уже через 30с образуются продукты гидратации C_3A [1], которые осаждаются на цементных частицах в высокодисперсном состоянии, а раствор в это время насыщен $Ca(OH)_2$ и сульфатом кальция, имеются условия создания устойчивой трехсульфатной формы гидросульфоалюмината кальция в процессе твердения цемента без дополнительного ввода гидросульфоалюмината кальция. Причем полученный таким образом гидросульфоалюминат кальция будет находиться в высокодисперсной форме и поэтому должен быть гораздо эффективнее добавок типа ГСАК-3.

В работе [2] указывается на то, что в формировании зародышей принимают участие не только отдельные молекулы или ионные пары, но и агрегаты, состоящие из 2 или 3 молекул. В таких условиях возникновение дефектов в зародышах неизбежно. О возникновении дефектов на ранней стадии и разной прочности новообразований свидетельствуют и данные работ [2,3]. Это подтверждается и фактической прочностью отдельных кристаллов, которая по данным работы [2], достигает значений порядка $2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$ МПа. Расхождения между фактической и теоретической прочностью объясняются об-

разующимися, как во время кристаллизации, так и во время деформации, дефектами.

Для ликвидации образующихся дефектов и отвода от поверхности цементных частиц продуктов гидратации можно применить энергию электрического поля. Определим, какой величины должна быть напряжённость используемого поля, которое сможет перемещать продукты гидратации от цементных частиц, с учётом действия сил поля, создаваемого поверхностью частицы при образовании на ней заряда в процессах её гидратации.

В типичных электролитах при наложении электрического поля перенос реагирующего вещества осуществляется по трем механизмам [4]: молекулярная диффузия, миграция частиц в электрическом поле, конвекция.

Согласно кинетической теории электропроводности [5], при наложении поля происходит не непрерывное движение ионов в водной среде, а через последовательную серию скачков из одного промежуточного состояния равновесия в другое. Этот переход связан с преодолением энергетического барьера. Движение возможно только при определенном количестве дополнительной энергии, которую продукты гидратации могут получить в момент соударения от ионов, движущихся с ускорением при наложении электрического поля.

При наложении электрического поля ионы получают ускорение, их движение описывается следующим уравнением:

$$m_i \cdot a_i = g_i \cdot \text{grad}U_y - F_{\text{тр}} \quad (1)$$

где m_i - масса иона, кг;

a_i - ускорение, получаемое ионом в момент приложения электрического поля, м/с^2 ;

g_i - заряд иона, Кл;

$\text{grad}U_y$ - градиент напряжённости прилагаемого электрического поля, В/м;

$F_{\text{тр}}$ – результирующая сила, действующая со стороны раствора (в её состав обычно включают электрофоретическую силу, силу релаксационного торможения и силу поля, создаваемого частицей), Н.

Электрофоретическая сила [5] связана с существованием ионной атмосферы и её перемещением в сторону, противоположную движению центрального иона.

$$F_{\text{эл.ф.}} = K_i \cdot (V_i + V_{ia}), \quad (2)$$

где K_i - коэффициент трения, который в соответствии с законом Стокса равен

$$K_i = 6\pi r \eta, \quad (3)$$

где r - радиус иона, м;

η - вязкость растворителя, Па*с;

V_i и V_{ia} - скорости движения иона и ионной атмосферы, м/с.

За счёт релаксационного эффекта ослабляется напряжённость внешнего электрического поля: $U - \Delta U$ [4]

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{g_i^2}{8\pi\epsilon\epsilon_0 kT r_g}, \quad (4)$$

где ΔU - увеличение напряжённости возмущающего поля, В/м;

U - напряжённости возмущающего поля, В/м;

ϵ - относительная диэлектрическая проницаемость;

ϵ_0 - электрическая постоянная $8,85 \cdot 10^{-12}$, Ф/м;

k - константа Больцмана;

T - температура раствора, $^{\circ}\text{K}$;

r_g - радиус Дебая

(5)

$$r_g = \frac{\sqrt{\epsilon\epsilon_0 kT}}{\sqrt{\sum_i n_{i0} z_i^2 e_0}}$$

где n_{i0} - объёмная концентрация (связана с локальным уравнением Больцмана);

z_i - валентность иона;

e_0 - заряд иона.

Объёмная концентрация электролита равна

$$n_i = n_{i0} e^{-\frac{W}{kT}}, \quad (6)$$

где W - работа, которую нужно затратить против усреднённых по времени электрических и других сил, чтобы вызвать изменение концентрации этого иона по сравнению с n_{i0} .

Используя модель Дебая-Хюккеля с учётом только кулоновских сил получаем

$$W = Z_i e_0 \psi, \quad (7)$$

где ψ - потенциал центрального иона на расстоянии от него, на котором объёмная концентрация равна n_i .

С учётом (4-7) выражение будет иметь следующий вид

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{g_i \sqrt{\frac{\sum_i z_i^2 e_0^2 n_{i0} e^{-\frac{z_i e_0 \psi}{kT}}}{85\epsilon\epsilon_0 kT \sqrt{\epsilon\epsilon_0 kT}}}}{85\epsilon\epsilon_0 kT \sqrt{\epsilon\epsilon_0 kT}} \quad (8)$$

В отличие от так называемых истинных электролитов, бетонная смесь сразу после затворения имеет внутренние электрические поля, создаваемые зёрнами цемента в процессе гидратации клинкерных минералов. Автор работы [3] предлагает функцию распределения электрического потенциала в диф-

фузном слое сольватной оболочки в зависимости от расстояния (z) от поверхности твёрдой фазы.

$$Z = \frac{1,15}{F_a} \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 RT}{65 C_{\infty}}} \lg \frac{\psi_0}{\psi} \quad (9)$$

где F_a - число Фарадея;

R - универсальная газовая постоянная;

C_{∞} - концентрация раствора, г. моль;

ψ_0 - электрический потенциал на поверхности частицы, тогда

$$\psi = \psi_0 e^{-2ZF_a} \sqrt{\frac{6\pi C_{\infty}}{\epsilon \epsilon_0 RT}} \quad (10)$$

Следовательно, сила, действующая на заряд, будет равна

$$F_{ц} = g_i \frac{\psi_0 (1 - \epsilon^{-2ZF_a \sqrt{\frac{6\pi C_{\infty}}{\epsilon \epsilon_0 RT}}})}{z} \quad (11)$$

Выражение (11) с использованием значений формул (2), (8) и (11) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} m_i \cdot a_i &= g_i \cdot \text{grad} U_y - 6\pi\eta(V_i + V_{ia}) - g_i \cdot \text{grad} U_y = \\ &= \frac{g_i^2 \sqrt{\frac{\sum z_i^2 e_0^2 n_i e}{RT}}}{8\pi\epsilon \epsilon_0 RT \sqrt{\epsilon \epsilon_0 RT}} - g_i \frac{\psi_0 (1 - \epsilon^{-2ZF_a \sqrt{\frac{6\pi C_{\infty}}{\epsilon \epsilon_0 RT}}})}{z} \end{aligned} \quad (12)$$

Выражение (12) показывает, что ускорение ионов зависит от его расстояния до клинкерной частицы. С учётом только первого и последнего слагаемых, так как второе и третье также уменьшают напряжённость подводимого электрического поля, определим взаимосвязь градиента напряжённости подводимого электрического поля и величины ускорения, получаемого ионом, а также его расстояние от цементной частицы.

$$\text{grad} U_y = \frac{\psi_0 (1 - \epsilon^{-2ZF_a \sqrt{\frac{6\pi C_{\infty}}{\epsilon \epsilon_0 RT}}})}{z} \quad (13)$$

Из выражения (13) можно найти расстояние иона от поверхности цементной частицы, на котором, в зависимости от величины градиента подаваемого поля, его ускорение будет равным нулю. В этом случае ионы, получаемые в процессе гидратации, под действием электрического поля будут ориентироваться в поле, но не удаляться от цементной частицы. Как показывает расчёт, при наложении электрического поля с $\text{grad} U_y = 600 \text{ В/м}$ ускорения можно получить только ионы, находящиеся на расстоянии $2 \cdot 10^{-7} \text{ м}$, а это плёнки связанной воды (куда входит и диффузный слой) [6], но под действием такого поля бетонная смесь быстро закипит. Поэтому для про-

ведения электроактивации для отвода ионов от поверхности цементных частиц или разрушения дефектных структур, необходима большая напряжённость электрического поля и кратковременное его действие, то есть необходимы поля определённого режима и с определённой частотой.

Выводы. 1. Проведен анализ воздействия электрического поля на ионны бетонной смеси с учётом полей, создаваемых гидратирующими цементными частицами. 2. Выполнены расчёты, показывающие, что удаляться от цементной частицы могут только ионы, расположенные от неё на расстоянии 10^{-7} м и более. 3. Для проведения электроактивации необходимы поля определённого режима и с определённой частотой.

Литература. 1. Электрические свойства бетона / А.Ф.Бернацкий, Ю.В.Целебровский, В.А.Чунцин; под ред. Ю.Н.Вершинина. - М.: Энергия, 1980.- 208 с. 2. Полак А.Ф. Теория гидратации вяжущих веществ // Сб. тр. НИИпромстрой. - Вып.17, т.2.- М., 1976.- С. 54 -106. 3. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона.- М.: Стройиздат, 1981.- 465 с. 4. Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия.- М.: Высшая школа, 1984.- 518 с. 5. Дамаскин Б.Б., Петрий Д.А.Электрохимия.- М.:Высшая школа, 1987.- 295 с. 6. Блещик Н.П. Структурно-механические свойства и реалогия бетонной смеси и прессвакуумбетона.- Минск: Наука и техника, 1977.- 231 с.