

2,1 мас.%) получают наиболее технологичные, быстро отверждающиеся связующие, однако изготовить теплоизоляционные изделия с высокой механической прочностью удалось только при использовании минеральных волокон. Опытная партия таких теплоизоляционных минераловатных плит была выпущена на ОАО «Семельстройматериалы» и успешно прошла испытания.

Разработанные силикатполимерные связующие были использованы для изготовления теплоизоляционных материалов на основе отходов производства ПАН-волокон, минеральной ваты и костры льна. Материалы изготавливались по стандартной технологии: формование ковра, пропитка связующим, сушка с применением принудительной вентиляции и отверждение при температуре 150 ... 180 °С. Свойства полученных материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства теплоизоляционных материалов на силикатполимерных связующих

Основные компоненты (кроме ЖС)	плотность, кг/м ³	Основные свойства		коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
		разрушающее напряжение, МПа, при		
		изгибе	растяжении	
N,N'-метилендималеимид, ПАН-волокно, ЖС	400–500	30–50	25–40	0,06–0,09
Эпоксидная смола ЭД-10, ПАН-волокно, ЖС	350–400	50–55	30–35	0,09–0,11
Эпоксидная смола ЭД-20, костра льна, ЖС	350–400	5,5–5,8	5,0–5,2	0,35–0,40
Глицерин, костра льна, ЖС	250–350	0,17–2,0	–	0,12–0,18
ФФС марки СФЖ-3027Б, минеральное волокно, ЖС	180–220	7,0–7,2	–	0,07–0,08
ФФС марки СФЖ-3027Б, минеральная вата, ЖС	125–140	0,19–0,25	–	0,05–0,06

Полученные органосиликатные связующие и материалы благодаря их высоким физико-механическим, технико-экономическим и экологическим показателям могут найти широкое применение в различных областях строительной индустрии.

УДК 691.332

МОДЕЛЬ КАРБОНИЗАЦИИ БЕТОНА ПО СЕЧЕНИЮ КОНСТРУКЦИЙ

Д. Н. ШЕВЧЕНКО, А. А. ВАСИЛЬЕВ, А. В. ХАНЕЕВ
Белорусский государственный университет транспорта

Карбонизация – процесс деградации защитных свойств бетона по отношению к арматуре железобетонных конструкций (ЖБК), эксплуатируемых в воздушных средах, который вызывает структурные изменения цементного камня и способствует процессу коррозии в арматуре. Поэтому весьма актуально всестороннее изучение данного процесса с целью диагностики текущего состояния ЖБК и прогнозирования их остаточного ресурса.

Проведенные экспериментальные исследования ЖБК по глубине показывают несостоятельность существующих представлений о фронтальном характере процесса карбонизации бетона. Анализ экспериментальных данных и сущность рассматриваемых физико-химических процессов показывает, что зависимость между степенью карбонизации SK и глубиной L монотонно убывающая: при $0 < L < 0,6$ м – практически линейная, затем асимптотически уменьшается до значения SK_{\min} , обусловленного технологией изготовления ЖБК.

Для построения математической модели, адекватно отражающей процесс карбонизации бетона по сечению конструкций, на основе экспериментальных данных используются методы регрессионного и корреляционного анализа. При этом подборе аппроксимирующей регрессионной кривой следуют двум противоречивым тенденциям, между которыми нужно искать компромисс:

- 1) с одной стороны, уравнение кривой стремятся усложнить для лучшего сглаживания экспериментальных точек (в случае сложных полиномов аппроксимация иногда превращается в интерполяцию);
- 2) с другой стороны, сложные аппроксимирующие функции обладают плохими предсказательными возможностями и содержат в своем составе большое число параметров, требующих оценки.

Кроме того, при выборе аппроксимирующей кривой необходимо учитывать суть происходящих физико-химических процессов деградации свойств бетона по глубине L .

Часто аппроксимирующая кривая удовлетворяет вышеперечисленным требованиям (хорошее сглаживание, соответствие здравому смыслу и т. п.) только на некотором интервале значений влияющей величины глубины L . Поэтому на разных интервалах используют различные аппроксимирующие кривые. Формальным критерием качества сглаживания точек интерполирующей кривой является коэффициент детерминации R^2 . Чем лучше кривая интерполирует точки, тем ближе R^2 к единице.

Представим основные требования к аппроксимирующей регрессионной функции $CK(L)$:

- 1) непрерывность функции карбонизации $CK(L)$ на интервале значений глубины $0 < L < 1$ м;
- 2) монотонное убывание $CK(L)$ на этом же интервале (производная функции $CK(L)$ на заданном интервале меньше нуля);
- 3) скорость убывания функции $CK(L)$ уменьшается с ростом значения L ($CK'(L_1) > CK'(L_2)$ при $L_1 < L_2$).

При подборе уравнения зависимости $CK(L)$ наилучшие результаты (хорошее сглаживание точек, большой R^2 , соответствие здравому смыслу и заданным выше требованиям) дали пятипараметрические уравнения вида

$$CK(L) = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 L) / (\alpha_3 + \alpha_4 L^3); \quad CK(L) = \beta_0 + \beta_1 \exp(-(L - \beta_2) / \beta_3)^{\beta_4},$$

где параметры α_i и β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) определяются методом наименьших квадратов, известным в математической статистике и реализованным, например, в пакетах Statgraphics или MathCAD.

Достоинством уравнения (1) является возможность аналитического определения параметров β_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) методом наименьших квадратов, а достоинствами уравнения (2) –

- большее, как правило, по сравнению с уравнением (1), значение R^2 ;
- функция удовлетворяет предъявляемым требованиям на всем множестве значений параметров;
- наличие конкретного физического смысла ее параметров β_i : β_0 определяет наименьшее значение $CK(L)$ (обычно, $\beta_0 = CK(1 \text{ м})$), β_1 – разность минимального и максимального значения $CK(L)$, β_2 – минимальное значение L (обычно $\beta_2 = 0$), $\beta_3 > 0$ и $\beta_4 > 0$ определяют форму кривой и координаты точек перегиба.

Основным недостатком функции (2) является невозможность аналитического определения ее параметров методом наименьших квадратов (в том числе с помощью пакетов компьютерной математики и статистического анализа данных) в силу нелинейности данной функции по параметрам. Единственным подходом видится численное решение задачи оценки параметров β_i с перебором всех возможных значений для минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от уравнения регрессии. Сложность реализации данного подхода заключается в следующем:

- наличие локальных минимумов суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от уравнения регрессии, что обуславливает полный перебор всех возможных значений параметров;
- перебор всех возможных значений параметров с точностью каждого из них в 3 значащие цифры требует $(10^3)^5 = 10^{15}$ итераций (здесь 5 – количество оцениваемых параметров).

Однако удалось уменьшить количество перебираемых параметров до двух (β_2 и β_3), определяя значения других параметров аналитически для заданных значений (β_2 и β_3). Таким образом, количество итераций удалось сократить до $(10^3)^2 = 10^6$, что требует всего нескольких минут машинного времени. В дальнейшем для определения параметров уравнения регрессии β_i будет использоваться метод случайного поиска, который:

- за незначительное машинное время позволит получать приемлемое по точности решение;
- за большее машинное время предоставляет более точное решение;
- позволит получать оценки параметров модели с точностью, ограниченной лишь представлением вещественных чисел в ЭВМ;
- даст возможность определять как локальные, так и глобальные минимумы суммы квадратов отклонений экспериментальных точек от уравнения регрессии.

Дополнительной особенностью предлагаемого подхода определения параметров регрессионной модели (2) карбонизации бетона по глубине является реализация взвешенного метода наименьших квадратов. Предложено использовать экспоненциальную весовую функцию $\lambda \exp(-\lambda L)$, управляя параметром которой (λ), можно минимизировать сумму квадратов отклонений экспериментальных точек от уравнения регрессии в первую очередь для малых значений глубины L .

Полученная математическая модель деградации свойств бетона и подход определения ее параметров позволит:

- автоматизировать процедуру контроля технического состояния и прогнозирования ресурса ЖБК;
- увеличить точность прогноза по сравнению с используемыми моделями (степенной функцией в пакете Excel и эвристической кривой).