А. И. Ф о м е н к о (Череповец, ЧГУ)**. Оптимизация составов сырьевых смесей для связывания отходов, содержащих тяжелые металлы.**

При решении задачи утилизации отходов, содержащих тяжелые металлы, в многочисленных работах рассматривается возможность их связывания в плотной структуре цементного камня. Доказано, что получение строительных материалов заданного санитарно-гигиенического качества на основе сырья с добавкой отходов, содержащих тяжелые металлы, является управляемым процессом. Основным условием допустимости введения таких отходов в сырьевую шихту вяжущего в технологическом аспекте является обеспечение физико-механических характеристик цементных композиций на уровне не ниже нормативных. Такая задача в работе, представленной данным сообщением, решалась применительно к отходу производства сварочных электродов. По химическому составу исследуемый отход характеризуется значительным ($24,27 \div 35,47$ мас.%) содержанием рутила.

При решении поставленной задачи сырьевая шихта вяжущего рассматривалась как сложный многофакторный композиционный материал, эксплуатационные характеристики которого находятся в прямой связи с составом и технологией его получения. Определение оптимального соотношения между компонентами сырьевой шихты проводили по прочности образцов, определяемой при испытаниях на сжатие и изгиб. В качестве факторов, от которых зависят прочность образцов цементного камня при сжатии y^σ и изгибе y^R, были взяты мас. доли: содержание портландцемента z_1, отхода z_2 и расход пластифицирующей добавки (на массу вяжущего) z_3. План эксперимента, в связи с многофакторностью функции $y = f(z_1, z_2, z_3)$, строился на основе рототабельного плана второго порядка Бокса–Хантера, преимуществом которого является отсутствие необходимости в постановке дополнительных параллельных опытов для оценки дисперсии воспроизводимости. В соответствии с матрицей плана эксперимента, были приготовлены смеси 20 составов вяжущего с содержанием отхода в пределах от 0 до 20 мас.% в растворах с песком (1 : 3 по массе). Испытания образцов вяжущего выполнены в соответствии с требованиями ГОСТ 310.3–76, ГОСТ 310.4–81. Из растворов пластичной консистенции формовали стандартные образцы-балочки размерами $40 \times 40 \times 160$ мм, которые через 28 суток твердения в водной среде при температуре $20 \pm 2^\circ$ С были испытаны на пределы прочности при сжатии и изгибе.

Результаты в виде значений функций y^σ и y^R показывают, что они сильно зависят от выбора уровней факторов z_j, колеблясь для образцов в условиях эксперимента в пределах, МПа: y^σ — $18,52 \div 30,68$; y^R — $3,35 \div 5,58$. При этом эффективность каждого фактора в отдельности скрыта. Однако знание их индивидуального проявления совершенно необходимо для определения оптимального состава вяжущего.

Полное уравнение регрессии с коэффициентами взаимодействия для трех факторов рототабельного плана второго порядка Бокса–Хантера имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^3 + b_{33}x_3^2,$$

где x_j — кодированные переменные в безразмерной системе координат, определяемые путем линейного преобразования координат по формуле $x_j = (z_j - z_j^0)/\Delta z_j$ для $j = 1, 2, \ldots, k$, где k — число факторов.

После расчета коэффициентов уравнения регрессии проведена статистическая проверка их значимости и пригодности полученных уравнений для описания исследуемых зависимостей. Полученные уравнения регрессии, позволяющие определять прочностные характеристики цементного камня на сжатие и изгиб в зависимости от состава композиции, имеют вид:

$$y^\sigma = 20,72 + 2,82x_1 - 1,45x_2 - 1,81x_1^2 + 1,28x_2^2, \quad y^R = 4,193 + 0,324x_1.$$

Проверка адекватности уравнений регрессии эксперименту выполнена по критерию Фишера (значения $F_{\text{расч.}}$ существенно меньше $F_{\text{табл.}}$). При этом использование теоретической модели $y = f(z_1, z_2, z_3)$, выраженной в виде приведенных уравнений регрессии, позволяет определять оптимальные условия, обеспечивающие максимум функции y, что имеет большое значение для получения композиций, отвечающих требованиям действующих строительных норм и правил.

Результаты физико-механических испытаний показали, что добавка отхода в сырьевую шихту вяжущего в оптимальном количестве (в пределах от 5 до 15 мас.%) способствует повышению прочностных характеристик затвердевшего камня. При этом наибольший прирост прочности обеспечивают сырьевая шихта, содержащая портландцемент, и отход, взятые в соотношении $1 : 0,1$ (по массе). Полнота и стабильность связывания компонентов исследуемого отхода в цементной матрице оценивались по выщелачиваемости. Результаты анализа водной фазы после испытания образцов кипячением показали значительное уменьшение выщелачивания гидроксида кальция по сравнению с контрольным образцом, изготовленным из вяжущего без добавки отхода, что определяет активные свойства добавки и обусловливает ее кислый характер. Установлено, что диоксид титана не выщелачивается из цементного камня. Характер и интенсивность взаимодействия химически активных компонентов отхода с гидроксидом кальция контролировали рентгенофазовым методом анализа минерального состава полученного цементного камня с использованием дифрактометра ДРОН-3М в излучении Cu–K_a. При этом установлено, что добавка отхода в составе сырьевой шихты вяжущего количественно не меняет характера взаимодействия клинкерных минералов с водой. Дифрактограмма содержит линии с межплоскостными расстояниями, обусловливающими присутствие в исследуемых образцах титанита, что согласуется с результатами анализа водной фазы после испытания образцов цементного камня кипячением.