

и силикатные материалы. Минск, 1974, вып. 3, с. 209 - 214.

12. Изучение процессов щелочной коррозии цинксодержащего стекла и продуктов его кристаллизации / Н.П.Гришина, Л.А. Жунина, А.А.Врубель и др. - В сб.: Стекло, ситаллы и силикатные материалы. - Минск, 1975, вып. 4, с. 36-42.

13. Поваренных А.С. Кристаллохимическая классификация минеральных видов. - Киев, 1966.

14. Явления ликвации в стеклах / Н.С.Андреев, О.В.Мазурин, Е.А.Порай-Кошиц и др. - Л., 1974.

15. Флоринская В.А., Печенкина Р.С. Инфракрасные спектры натриево-силикатных стекол и связь их со структурой. - Оптика и спектроскопия, 1956, т. 1, вып. 5, с. 690.

16. Ермолаева Е.В., Скоробогатова И.В. Инфракрасные спектры пропускания закаленных в стеклообразное состояние алюмосиликатных расплавов. - В сб.: Стеклообразное состояние. М., 1965, с. 215-218.

17. Колесова В.А. Инфракрасные спектры поглощения бариево- и стронциевосиликатных стекол. - Изв. АН СССР. Сер. "Неорган. мат-лы", 1968, 4, № 9, с. 1612-1614.

18. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры силикатов. - М., 1967.

19. Колесова В.А. Инфракрасные спектры поглощения малощелочных и бесщелочных алюмосиликатных стекол. - Изв. АН СССР. Сер. "Неорган. мат-лы" 1965, № 3, с. 442-445.

УДК 660.01

О.С.Бабушкин

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ШЛАКОСОДЕРЖАЩЕГО СТЕКЛА ПИРОКСЕНОVOГО СОСТАВА

По методу математического планирования эксперимента [1] задача синтеза оптимального состава шлакосодержащего стекла без учета влияния внешних факторов синтеза (скорость подъема температуры, окислительно-восстановительный потенциал газовой среды, температура варки и время выдержки) в первом приближении сводится к установлению взаимосвязи состав - свойство для исследуемой области составов. При условии нормированности суммы независимых переменных $\sum_{i=1}^q X_i = 1$ (сумма всех компонентов равна 1.00%) выявляется коррелированность исследуемых факторов, которая в аналитическом виде мо-

жет быть выражена уравнением регрессии. Полученное уравнение позволяет затем расчетным путем определить оптимальный состав стекла в исследуемой области. Такая схема планирования эксперимента дает возможность строить стратегию исследования, основанную на последовательности четких, логически осмысленных операций, и исключает постановку большого числа опытов [2, 3].

В данной работе поиск оптимального состава стекла проводили с применением планов, использующих вершины многогранников решений, предложенных Лином и Андерсеном [8]. В качестве переменных величин X_i (компонентов шихты) для синтеза стекол пироксенового состава были использованы шлак Актюбинского завода ферросплавов, песок, сода и углекислый кальций. Интервалы изменения шлака в исследуемых шихтах выбраны по данным предварительного исследования и равны 45–55 мас. ч. Содержание песка в шихтах изменялось от 40 до 50 мас.ч, что соответствовало интервалу варьирования SiO_2 для стекол пироксенового состава [4]. Введение в состав шихты CaO (0–8 мас.ч) в виде $CaCO_3$ обусловлено, с одной стороны, необходимостью снижения вязкости силикатного расплава [5], с другой – увеличением вероятности образования пироксенов в направленном процессе минералообразования при термической обработке шлакового стекла. С целью ускорения процессов силикато- и стеклообразования в состав исследуемых шихт вводили Na_2O (1–5 мас.ч) в виде Na_2CO_3 .

Согласно плану Лина и Андерсена [8], исследуемые экспериментальные составы выражены в виде координат вершин, центроидов граней и многогранника, описывающих его поверхность, которая ограничена в факторном пространстве условиями $0 \leq a_i \leq X_i \leq b_i \leq 1$ (X_i – независимая переменная; b_i и a_i – факторные уровни). Расчет координат точек плана осуществляли по алгоритму, включающему выбор всех возможных сочетаний нижних и верхних уровней компонентов, при условии сохранения уровня одного компонента в каждой комбинации незаполненным. Используя ограничения, исключающие вырожденные ситуации при $\sum_{i=1}^q a_i \geq 1$ или $\sum_{i=1}^q b_i \leq 1$, нарушающие условие $X_1 + X_2 + \dots + X_i = 1$, а также $a_i \neq b_i$, из полученных $q \cdot 2^{q-1}$ комбинаций выделяются лишь те, для которых сумма пропорций компонентов меньше единицы, и вместо прочерка вписывается число, дополняющее эту сумму до единицы. Полученные экспериментальные составы соответствуют координатам вершин искомого многогранника. Центроиды для r -мерных граней многогранника

$3 \leq r \leq q - 2$ находили путем усреднения координат вершин, имеющих равные $q - r - 1$ координаты [8]. Координаты центроида многогранника определяли усреднением всех координат вершин и центроидов граней многогранника. При четырех переменных количество экспериментальных составов равнялось 15.

Варку экспериментальных составов стекол осуществляли в 300 г фарфоровых тиглях в газовой печи в окислительных условиях [4] при температуре 1500°C . Параметр оптимизации (Y) определялся по совокупности оценок технологических качеств стекла, учитывающих его варочные, выработочные и кристаллизационные свойства. Величина Y для каждого стекла определялась по формуле $Y = K_B + K_K$, где K_B - оценка варочных и выработочных свойств стекол; K_K - оценка кристаллизационной способности стекол по данным градиентной кристаллизации. Значения K_B определяли по формуле $K_B = 10 + K_T$ (10 - принятая нами оценка варочных и выработочных свойств стекол согласно требованиям стекловарения; K_T - оценка наблюдаемых технологических пороков стекол). Кристаллизационная способность стекол (K_K) оценивалась по ранговой системе по степени их закристаллизованности при 900°C (табл. 1).

Экспериментальная проверка 15 исследуемых составов стекол, соответствующих 15 полученным комбинациям условий плана, дала следующие значения оптимизируемого параметра (Y):

(1) - 3,25	(5) - 1,25	(9) - 4,0	(13) - 3,5
(2) - 5,5	(6) - 2,0	(10) - 10,0	(14) - 10,5
(3) - 7,0	(7) - 9,5	(11) - 8,5	(15) - 5,0
(4) - 10,5	(8) - 11,5	(12) - 5-6,5	

Расчет коэффициентов уравнения регрессии проводили на ЭВМ "ЕС-1022" по программе шагового регрессионного анализа [6]. Полученное уравнение регрессии имело следующий вид:

$$Y = 19,08 - 34,43X_1 + 66,53X_3 + 55,28X_4.$$

Отсутствие переменной X_2 в уравнении объясняется особенностью шагового регрессионного анализа, позволяющего выявить сильные корреляционные связи переменных с функцией отклика, дать оценку их вклада в уравнение регрессии и исключить переменные, имеющие минимальные частные коэффициенты корреляции.

Анализ полученного уравнения регрессии подтверждает очевидность известных в стекловарении сведений о том, что введение CaO и Na_2O в состав шлаковых стекол в определен -

Таблица 1. Система оценок технологических пороков стекломассы и степени закристаллизованности стекол при 900°С

Индекс	Виды технологических пороков	K _i	Значения
K _Т	Кристаллическая корка на поверхности стекломасс	K ₁	-6
	Пена на поверхности стекломассы	K ₂	-1,5
	Наличие непроварившихся компонентов шихты в стекломассе	K ₃	-3
	Наличие газовых включений в стекломассе	K ₄	-1
	Качественная оценка степени кристаллизации		
K _К	Опалесценция стекла	K ₅	0,25
	Поверхностная кристаллизация в виде сплошной тонкой пленки	K ₆	0,5
	Пористая кристаллическая структура	K ₇	1,0
	Частичная крупнокристаллическая структура	K ₈	1,5
	Частичная мелкокристаллическая структура	K ₉	2,0
	Полная кристаллизация образца. Крупнокристаллическая структура	K ₁₀	2,5
	Полная кристаллизация образца. Мелкокристаллическая структура	K ₁₁	3,0

ных пределах улучшает их технологические и кристаллизационные свойства. Для решения задачи нахождения оптимального состава стекла, т.е. максимума линейной формы переменных $(-34,43X_1 + 66,53X_3 + 55,28X_4)$, в интервалах их варьирования был использован симплексный метод линейного программирования [7]. Полученный оптимальный состав смеси (шихты) соответствует значениям переменных: $X_1 = 45$ мас.ч; $X_2 = 42$; $X_3 = 8$; $X_4 = 5$ мас.ч. Проверка технологических и кристаллизационных свойств стекла оптимального состава показала пригодность для получения на его основе шлакоситалла. Продукты кристаллизации, по данным рентгенофазового анализа, представлены пироксеновым твердым раствором диоксидоподобной структуры (рис. 1).

Таким образом, использование метода математического планирования эксперимента позволило разработать состав стекла при минимальном количестве экспериментальных составов (15),

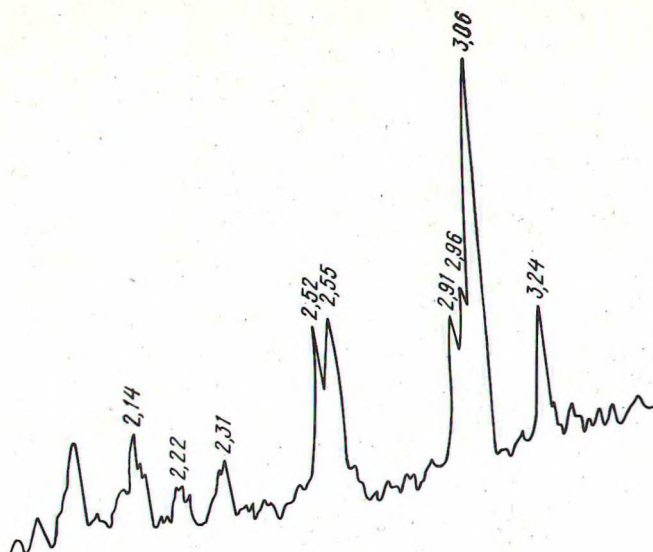


Рис. 1. Фазовый состав продуктов кристаллизации стекла оптимального состава.

обладающий лучшими технологическими, кристаллизационными свойствами и пригодный для получения на его основе пироксенового шлакоситалла.

Л и т е р а т у р а

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М., 1976.
2. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях - Киев, 1975.
3. Саутин С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. - М., 1975.
4. Жунина Л.А., Кузьменков М.И., Яглов В.Н. Пироксеновые ситаллы. - Минск, 1974.
5. Павлушкин Н.М., Саркисов П.Д., Орлова Л.А. Шлакоситаллы за рубежом. - М., 1976.
6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. - М., 1973.
7. Зедгенидзе И.Г. Планирование эксперимента при исследовании многокомпонентных систем. - М., 1976.
8. Lean R.A. Mc. Anderson V.L. Extreme vertices design of mixture experiments. - *Technometrics*, 1966, 8, N 3.