

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КОНТРОЛИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ГАЗОСИЛИКАТА ДО АВТОКЛАВНОЙ ОБРАБОТКИ

Вознесенский В.А., Гаврилюк В.П., Ляшенко Т.В., Хлыцов Н.В.
(Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Проаналізовано зв'язок компромісно оптимізованих критеріїв якості газосилікату з п'ятьма температурно-часовими параметрами структуроутворення технологічної суміші. Побудовано нелінійні моделі впливу 7 факторів на ці параметри.

Введение. Информация о параметрах структурообразования многокомпонентных строительных материалов на начальных стадиях технологического процесса (от смешивания компонентов до достижения смесью заданного уровня физико-механических свойств) необходима для оптимизации как этого процесса, так и качества готовой продукции. Данные об уровнях параметров структурообразования позволяют корректировать качественный состав и количество дополнительной жидкой фазы, момент и интенсивность промежуточных физических воздействий, режим тепловой обработки, реализуя «принцип соответствия» О.П. Мчедлова-Петросяна [1, с.182]. При этом параметры структурообразования должны допускать оперативный контроль (в производственных условиях) и иметь числовые оценки, которые связаны (с известным риском) с критериями качества готовой продукции.

Выполнен комплекс вычислительных экспериментов [2-5], позволивших на полях свойств автоклавного газосиликата различных марок по плотности и классов по прочности, найти компромиссные решения и соответствующие уровни 9 рецептурно-технологических (РТ) факторов. Цель данной работы – оценить возможные связи критериев качества готового газосиликата с пятью контролируемыми параметрами структурообразования: временем (мин) конца вспучивания (*expansion*) – τ_E и конца схватывания (*setting*) – τ_S , температурами ($^{\circ}C$) заливки (*pouring*) – t_P , вспучивания – t_E и максимальной – t_{max} .

Натурный эксперимент и границы изменения контролируемых параметров структурообразования. Кафедра ПАТСМ ОИСИ и НИПИСиликатобетон МПСМ СССР проводили комплексное исследование [2] влияния рецептурно-технологических факторов на свойства и параметры структуры автоклавного газосиликата. В натурном эксперименте варьировалось девять факторов ($X_{0,i} \pm \Delta X_i$): D – растекаемость растворной смеси по Сутгарду, $X_1 = 27 \pm 4$ (см); w_s – влажность песка при совместном помоле с известью, $X_2 = 5 \pm 3\%$; S_s – удельная поверхность песка, $X_3 = 250 \pm 100$ (m^2/kg); τ – изотермическая выдержка в автоклаве, $X_4 = 8 \pm 4$ (час); p – рабочее давление пара в автоклаве, $X_5 = 1.0 \pm 0.2$ (МПа); A – количество алюминиевой пудры (% от сухой массы), $X_6 = 0.07 \pm 0.03$; a_{CaO} – активность смеси (доля CaO в смеси извести и песка), $X_7 = 17 \pm 3\%$; t_w – температура воды затворения, $X_8 = 35 \pm 10$ ($^{\circ}C$); C – количество цемента (% от массы смеси), $X_9 = 10 \pm 10$.

При девяти факторах начальная полная квадратичная ЭС-модель содержит 55 оценок коэффициентов. Был синтезирован план эксперимента из 56 точек, со структурой Рехтшафнера.

Факторы, связанные с режимом автоклавной обработки, не могут влиять на параметры структурообразования вспучиваемой газосиликатной смеси. Исключение x_4 (τ) и x_5 (p) приводит к появлению одинаковых технологических смесей в плане с 56 разными условиями получения готовых блоков. Для 11 смесей вычислены средние значения и в анализе использована 7-факторная матрица с $N=45$ разными строками.

Технологические смеси и газосиликатные блоки были изготовлены в опытно-промышленных условиях. Параметры структурообразования (временные τ_E , τ_S и температурные t_P , t_E , t_{max}) определены для смесей, залитых в формы. Из блоков, выпиливались образцы сечением 4×4 см. Экспериментально определены многочисленные прямые и косвенные критерии качества газосиликата, в частности, плотность γ (кг/м³), пределы прочности (МПа) при сжатии и изгибе R_c и R_b , предельная упругая составляющая деформативности при изгибе ε (мм/м) и коэффициент теплопроводности λ (мВт/м•К).

Обобщающие показатели результатов определения каждого из пяти параметров структурообразования приведены в табл. 1. Уровни средних Y_{av} , как и предполагалось, оказались близкими к наиболее типичным. У этого информационного массива есть две особенности. Во-первых, диапазоны $\Delta\{Y\}$ достаточно широки и охватывают большинство встречающихся на практике значений. Во-вторых, в отличие от температурных параметров, время конца вспучивания τ_E и конца схватывания τ_S распределены в своих диапазонах резко асимметрично (риск ошибки $\alpha \ll 0.001$). Этот факт, как и высокий уровень относительного прироста $\delta\{Y\}$, указывает на необходимость [6] использовать в дальнейшем при анализе и моделировании преобразование $\ln t$.

Анализ парных связей контролируемых параметров структурообразования с критериями качества газосиликата. Коэффициенты корреляции между анализируемыми величинами представлены в табл. 2; следует отметить, что коэффициенты корреляции с пределами прочности и деформативностью не могут приближаться к ± 1 , поскольку основные процессы образования гидросиликатов кальция в известково-кремнеземистом вяжущем проходят при автоклавной обработке.

Коэффициенты корреляции разделены на четыре группы.

Таблица 1. Обобщающие показатели контролируемых параметров структурообразования

	τ_E	τ_S	t_{max}	t_P	t_E
Y_{av}	15.8	25.8	64.6	36.3	56.5
$s\{Y\}$	13.7	24.2	12.7	6.7	13.4
Y_{max}	67	94.25	98	54	98
Y_{min}	4.5	5.5	38.5	25.8	34.0
$\Delta\{Y\}$	62.5	88.75	59.5	28.25	64
$\delta\{Y\}$	14.9	17.1	2.5	2.1	2.9
A	2.2	1.8	0.3	0.6	0.9

Риск отсутствия линейной связи (с $\ln t$ или t) менее 0.05% при 43 степенях свободы соответствует $r > 0.465$. Такую связь следует признать достоверной. Она в табл. 2 обнаружена только дважды – прочность на изгиб возрастает пропорционально $\ln t_E$ и $\ln t_S$. Это, по-видимому, отражает тот факт [7], что при интенсивном газообразовании и вспучивании в перегородках могут образовываться дефекты, снижающие сопротивление растягивающим нагрузкам. При увеличении риска до 0.5% (критический $r=0.380$) практически достоверными можно считать еще четыре связи. Это, прежде всего снижение R_b с ростом температуры заливки, что усиливает правдоподобность упомянутой выше гипотезы. Обнаруживается также положительная связь прочности на сжатие R_c с временными параметрами. Следует особо отметить выявление положительной корреляции коэффициента теплопроводности λ с продолжительностью периода вспучивания (более сильная, чем у плотности газосиликата), что может быть связано со спецификой распределения пор по размерам [8].

В третью группу вошли 9 коэффициентов корреляции, значимых с риском от 0.5 до 5% (критический $r=0.249$). Для 10 пар «параметр – критерий» гипотеза линейной связи отклонена; среди них пять, включающих деформативность ε . Не подтвердилась и гипотеза о линейной связи критериев качества газосиликата с приростами температур ($t_E - t_P$, $t_{max} - t_P$, $t_{max} - t_E$).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции технологических критериев и свойств

	$\ln\tau_E$	$\ln\tau_S$	t_p	t_S	t_{max}
γ	0.30		-0.35		
R_c	0.44	0.40	-0.33		-0.26
R_b	0.51	0.47	-0.39	-0.29	-0.31
ε					
λ	0.44	0.33	-0.37		-0.34

Значительно меньше риск ошибки при гипотезе нелинейной связи критериев качества газосиликата с параметрами структурообразования. Уже при гипотезе простой квадратичной формы (рис. 1) связи всех 25 пар оказываются значимыми (риск менее 5%).

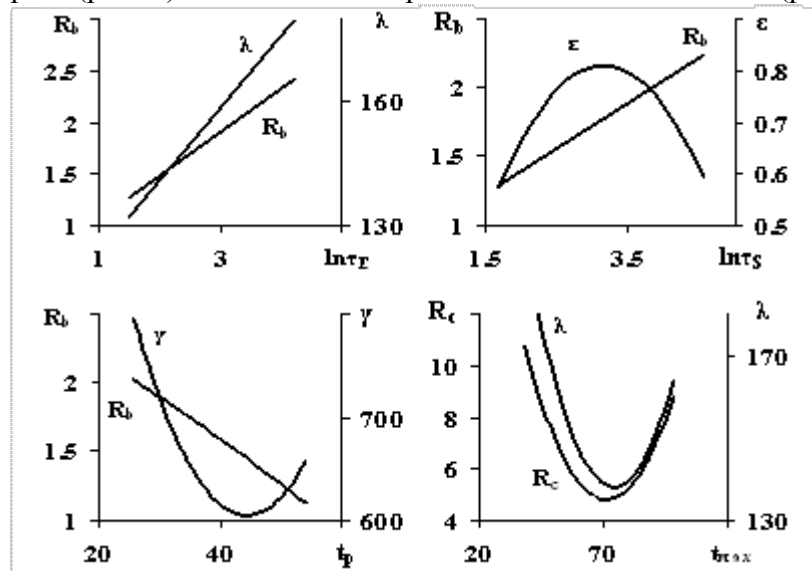


Рис. 1. Восемь линейных и квадратичных графиков практически достоверных (риск менее 0.5%, N=45) связей параметров структурообразования с критериями качества газосиликата

В группу достоверных связей ($\alpha < 0.05\%$), дополнительно к линейным $R_b(\ln\tau_E)$ и $R_b(\ln\tau_S)$, входят четыре параболических: связь R_c и λ с t_{max} , а главное – деформативности с обоими временными параметрами.

Гипотезу нелинейности можно усложнить, добиваясь высоких уровней коэффициентов детерминации (система “Curve Expert” рекомендует сложные функции с R^2 около 0.8), однако в данной задаче необходимости в этом нет. Квадратичные параболы имеют некоторое преимущество, поскольку эта форма подобна однофакторным сечениям квадратичных ЭС-моделей.

Квадратичные модели влияния 7 РТ-факторов на параметры структурообразования газосиликатной смеси. План с 45 различными строками (образованный регламентами производства газосиликата до автоклавной обработки) позволяет рассчитать квадратичные ЭС-модели. Расчеты выполнены в модернизированной системе COMPEX-2009, отличающейся расширенным до 9 числом учитываемых факторов, для которых последовательный регрессионный анализ может быть проведен и при фиксированной, и при генерируемой [9, с. 103] ошибках эксперимента. Пять моделей со значимыми оценками коэффициентов показаны в табл. 3.

Таблица 3. ЭС-модели пяти параметров структурообразования

b	$\ln t_E$	$\ln t_S$	t_{max}	t_p	t_E	b	$\ln t_E$	$\ln t_S$	t_{max}	t_p	t_E
b_0	2.756	3.252	70.11	36.7	54.66	b_{17}		-0.03		-0.86	-0.97
b_1			-1.18			b_{18}					
b_2		0.1	-6.05	-1.12	-4.79	b_{19}		0.029	0.95	0.421	
b_3	-0.16	-0.24		3.806		b_{23}		0.066	0.966	-1.75	
b_6	-0.11	-0.06	1.301	-0.61		b_{26}		-0.06			-1.23
b_7	-0.07	-0.2	5.836	1.313	5.376	b_{27}		-0.06	-1.8		-2.73
b_8	-0.2	-0.16	3.395	4.732	5.353	b_{28}		0.074		-0.27	
b_9	0.627	0.797	-8.2	-2.27	-9.53	b_{29}		-0.03	2.047	0.572	2.252
b_{11}				2.181		b_{36}		0.1	0.951	-1.04	-1.39
b_{22}		-0.12		2.304	6.305	b_{37}			-0.94	1.618	-1.27
b_{33}		0.223	-8.77	-2.63		b_{38}	0.099				
b_{66}	-0.28	-0.13				b_{39}		-0.15	2.286	-1.36	2.969
b_{77}					-4.86	b_{67}				-0.43	2.915
b_{88}						b_{68}		-0.04		0.376	-1.26
b_{99}		-0.3				b_{69}	0.122			0.847	2.649
b_{12}		0.032			1.257	b_{78}	0.064	-0.06		-1.09	2.11
b_{13}				-0.21		b_{79}		-0.03		-0.62	-3.85
b_{16}			0.865			b_{89}	-0.21	0.058		-1.07	-1.28

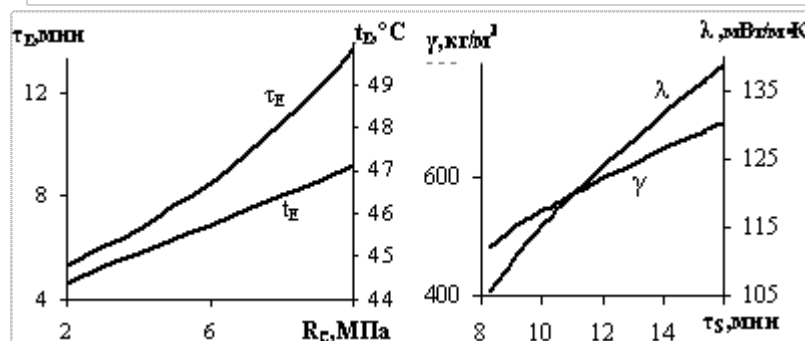


Рис. 2. Два варианта анализа связи параметров структурообразования с уровнями критериев качества, найденными при поиске компромисса

Приведенные в табл. 3 модели используются в вычислительных экспериментах, главным образом, совместно с ЭС-моделями, описывающими влияние 9 РТ-факторов на критерии качества газосиликата [2]. В данной работе показаны некоторые результаты решения задачи о связи критериев качества 12 компромиссно оптимальных материалов (при разном сочетании марок по плотности и классов по прочности на сжатие) [4] с соответствующими этим условиям параметрами структурообразования. На рис. 2 показаны 2 варианта решений в виде практически достоверных кривых (риск $\alpha < 1\%$). В первом случае отражены изменения времени вспучивания t_E (мин) и температуры вспучивания t_E (°C) в зависимости от уровня R_c , полученного при поиске компромисса. Во втором – показана тенденция повышения компромиссных уровней плотности газосиликата γ и коэффициента его теплопроводности λ при увеличении контролируемого параметра структурообразования – времени конца схватывания t_s (мин). Замена логарифмических координат на метрические с целью облегчения восприятия результатов приводит к искривлению линеаризованных функций [6]; время вспучивания $t_E(R_c)$ интенсивно возрастает, а темп изменения плотности $\gamma(t_s)$ и коэффициента теплопроводности $\lambda(t_s)$ замедляется.

Заключение

Числовые оценки реологических, термокинетических и других контролируемых в производственных условиях параметров структурообразования в технологических смесях

полезны для принятия инженерных решений и по производству строительных композитов, и по качеству готового материала. Выявлены достоверные (риск $\alpha < 0.05$) и практически достоверные (риск $\alpha < 0.5$) связи между параметрами структурообразования газосиликата до автоклавной обработки с критериями качества готового материала, хотя остаются большими ошибки предсказания. Их уровень можно снизить в результате вычислительных экспериментов [9, с. 45] с комплексом ЭС-моделей, включающих и модели параметров структурообразования. Кроме того, комплекс моделей позволяет решать нетривиальные задачи в материаловедении ячеистых композитов.

Summary

The relations of compromise optimisation criteria of autoclaved aerated concrete quality with five time and temperature parameters of technological mix structure formation have been analysed. Non-linear models of the influence of 7 factors on these parameters have been built.

Литература

1. Мчедлов-Петросян О.П. Химия неорганических строительных материалов / О.П. Мчедлов-Петросян. М.: Стройиздат, 1988. – 304 с.
2. Вознесенский В.А. Автоклавный газобетон: Девятифакторное квадратичное моделирование (1981-85) и компьютерное материаловедение (2007-08) / В.А. Вознесенский, В.П. Гаврилюк, В.Я. Керш и др. // Компьютерное материаловедение и прогрессивные технологии: Мат-лы международ. семинара МОК'47. – Одесса: Астропринт, 2008. – С. 97-104.
3. Вознесенский В.А. Компромиссная оптимизация свойств газосиликата при дискретных равномерно распределенных уровнях девяти рецептурно-технологических факторов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, В.П.Гаврилюк // Сучасні будівельні матеріали. Вісник ДонНАБА, Випуск 2009-1 (75).` Макіївка, 2009. – С. 139-145.
4. Вознесенский В.А. Связь результатов компромиссной оптимизации с нормативами по плотности и прочности газобетона / В.А. Вознесенский, В.П.Гаврилюк, Т.В. Ляшенко, А.Б. Тымняк // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2009. – Випуск 35. – С. 56-63.
5. Вознесенский В.А. Поиск компромиссных решений случайным сканированием полей свойств газосиликата / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, В.П. Гаврилюк // Науковий вісник ЛНАУ. – Луганськ, 2010 – №14. – С. 137-148.
6. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительно-технологичных задач на ЭВМ. / В.А.Вознесенский, Т.В.Ляшенко, Б.Л.Огарков. К.: Высшая школа, 1989. 328 с.
7. Меркин А.П. Научные и практические основы улучшения структуры и свойств поризованных бетонов. Автореф. дис. д-ра техн. наук (05.23.05) / А.П. Меркин. – М., 1972. – 35 с.
8. Хлыщов Н.В. Оптимизация структуры и теплофизических характеристик ячеистого бетона по результатам лазерной порометрии: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» / Н.В. Хлыщов. – Ростов-на-Дону, 1985. – 22 с.
9. Вознесенский В.А. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко // Одесса: Астропринт, 2006. – 116 с.