

# КОМПРОМИССНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПО ПРОЧНОСТИ В РАЗНЫХ СРЕДАХ

*Ляшенко Т.В., Гара Ан.А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)*

**Введение.** При разработке защитных эпоксидных композиций (патент Украины 5408) на пластифицированной смоле «Макро» была установлена возможность повышения их стойкости в воде и нефти за счет введения фурфурола и цеолита [1, 2]. Такие композиции могут использоваться, в частности, для защиты конструкций станций обслуживания транспорта и других сооружений, подверженных воздействию смесей воды с нефтепродуктами, ПАВ и т.д.

Поскольку практически невозможно провести длительные испытания материалов в таких неоднородных средах, предложено определять свойства композиций после экспозиции отдельно в воде и отдельно в двух видах нефти. Назначить составы для работы в реальных средах можно по результатам поиска компромиссных решений. Поиск осуществляется с помощью вычислительных экспериментов на полях свойств материала в координатах состава [3, 4].

**Условия эксперимента, моделирование, анализ.** В натурном эксперименте варьировались 5 факторов ( $X_i = X_{i,0} \pm \Delta X_i$ ) состава полимерраствора [5]: степень наполнения – количество минерального каркаса (наполнитель и песок),  $X_1 = 280 \pm 100$  м.ч. (на 100 массовых частей эпоксидной смолы «Макро»); массовая доля наполнителя (диабаз и цеолит) в каркасе,  $X_2 = 0.6 \pm 0.3$ ; доля цеолита (мелкого и крупного) в наполнителе,  $X_3 = 0.15 \pm 0.1$ ; доля в цеолите крупных зерен,  $X_4 = 0.25 \pm 0.25$ ; дозировка фурфурола,  $X_5 = 7 \pm 5$  м.ч. (на 100 смолы).

Для каждой из 27 композиций, заданных планом эксперимента, помимо общетехнических свойств, определены особые характеристики ремонтных растворов и защитных покрытий, в частности, водо- и нефтепоглощение. Прочность при изгибе (МПа) определялась после выдерживания образцов в нормальных условиях (R) и в течение 6 месяцев отдельно в трех средах: воде ( $R_W$ ), «легкой» нефти ( $R_{PL}$ ) и «тяжелой» нефти ( $R_{PH}$ ). Экспериментальные значения этих трех критериев качества материала представлены на диаграммах рассеяния (рис. 1).

Прочности  $R_{PL}$  и  $R_{PH}$  коррелируют с  $R_W$  (риск менее 1%). Слабее статистическая линейная связь (с риском более 1%) между  $R_{PL}$  и  $R_{PH}$  (рис. 1), а гипотезу о корреляции с R можно принять только для  $R_{PH}$ .

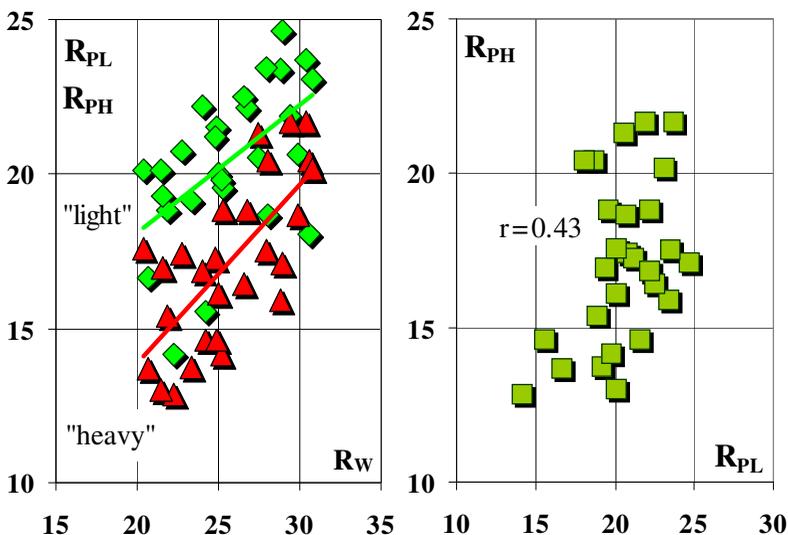


Рис. 1. Диаграммы рассеяния прочности при изгибе (МПа) после выдерживания образцов в воде ( $R_w$ ) и двух видах нефти ( $R_{PL}$ ,  $R_{PH}$ )

Это указывает на то, что составы, обеспечивающие лучшие уровни одних критериев прочности, могут не удовлетворять требованиям по другим. Может оказаться необходимым поиск компромисса.

Осуществить поиск приемлемых, оптимальных и компромиссных композиций позволяют, ЭС-модели, построенные по экспериментальным данным для 27 составов и описывающие поля  $Y(\mathbf{x})$  критериев качества полимерраствора в области  $\Omega_x$  пяти нормализованных координат состава  $x_i = (X_i - X_{i,0})/\Delta X_i$ ,  $|x_i| \leq 1$ . В частности, модели (1-3), со значимыми коэффициентами при риске 5, 10 и 10% соответственно, представляют рецептурные поля прочности материала при изгибе после экспозиции в воде, легкой нефти, тяжелой нефти.

Следует отметить, что оцененные по (1-3) лучшие и худшие уровни прочности после воздействия разных сред соответствуют разным уровням наполнения и дозировкам модификаторов:

$$R_{w,max} = 33.1 \text{ МПа (при } x_1 = x_2 = x_3 = +1, x_4 = -1, x_5 = -0.3),$$

$$R_{PL,max} = 25.3 (x_1 = -1, x_2 = x_4 = +1, x_3 = -0.7, x_5 = 0.9),$$

$$R_{PH,max} = 22.9 (x_1 = x_4 = -1, x_2 = 0.4, x_3 = x_5 = +1);$$

$$R_{w,min} = 17.3 (x_1 = -0.1, x_2 = x_3 = x_5 = -1, x_4 = +1),$$

$$R_{PL,min} = 14.7 (x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = -1),$$

$$R_{PH,min} = 10.9 (x_1 = -0.2, x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = -1).$$

$$R_W = 23.8 + 0.7x_1 + 2.0x_2 + 0.7x_3 - 0.7x_4 + 5.1x_1^2 - 2.3x_5^2 - 0.6x_1x_5 - 0.7x_2x_3 - 1.1x_3x_4 + 0.6x_4x_5 \quad (1)$$

$$R_{PL} = 20.4 + 1.2x_2 + 0.6x_3 + 0.5x_4 - 0.7x_1x_2 - 0.6x_1x_3 - 0.5x_1x_4 - 0.7x_1x_5 + 1.0x_2x_4 - 0.8x_3x_4 - 1.1x_3x_5 \quad (2)$$

$$R_{PH} = 15.8 + 1.5x_2 + 0.4x_3 - 0.9x_4 + 0.3x_5 + 2.7x_1^2 - 1.7x_2^2 + 1.1x_3^2 - 0.6x_1x_3 - 0.3x_1x_5 - 1.2x_2x_3 - 0.6x_2x_4 + 0.6x_2x_5 - 1.1x_3x_4 - 0.6x_3x_5 \quad (3)$$

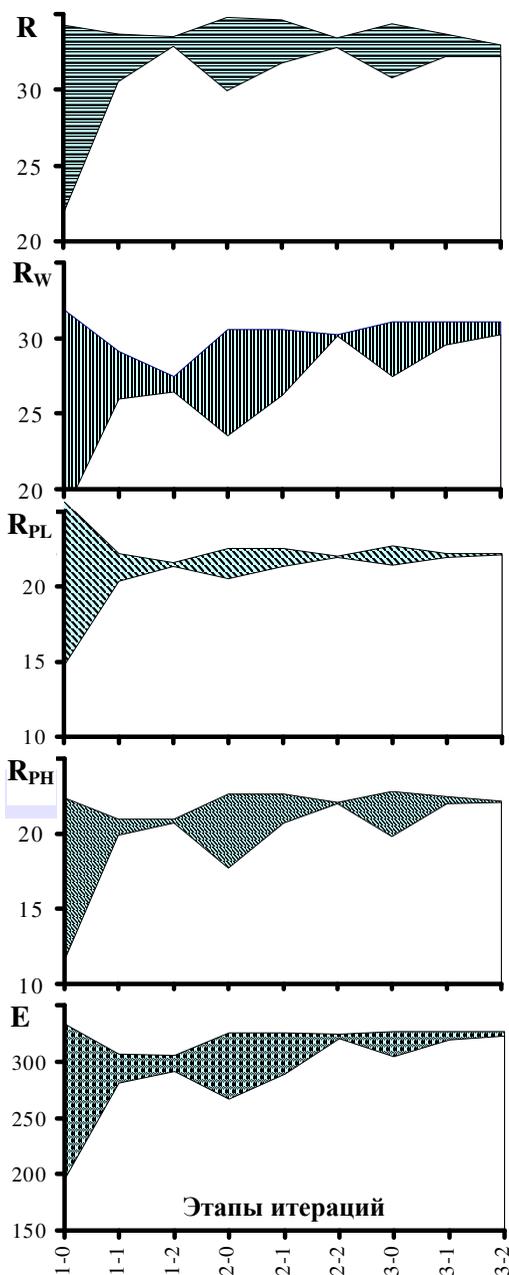
Анализ моделей (1-3) и описанных ими однофакторных локальных полей в зонах экстремумов показал что:

- роль фурфурола различна для разных сред, максимальная дозировка полезна для работы с нефтью, но может снизить прочность в воде;
- количество наполнителя с разной интенсивностью влияет на прочность при изгибе в воде, легкой и тяжелой нефти;
- подтверждая необходимость компромисса, положительное в целом влияние цеолита оказывается неоднозначным в составах повышенной прочности, а в зоне максимума  $R_{PL}$  может быть оправдано добавление крупных зерен.

**Поиск компромиссных составов.** Итерационная процедура [3, 4] случайного сканирования полей свойств (критериев качества, ресурсосбережения и др.) позволила с помощью метода Монте-Карло решить ряд оптимизационных задач, в которых, с учетом типовых характеристик ремонтных полимеррастворов [6], были заданы следующие требования:  $R(\mathbf{x}) \geq 25$ ,  $R_W(\mathbf{x})$ ,  $R_{PL}(\mathbf{x})$ ,  $R_{PH}(\mathbf{x}) \geq 20$  МПа. Технологическое ограничение – по эффективной вязкости  $150 \leq \eta(\mathbf{x}) \leq 500$  Па·с (при скорости сдвига  $1 \text{ с}^{-1}$ ), которая существенно обусловлена расходом эпоксидной смолы (г/кг), определяемым степенью наполнения и количеством фурфурола «критерием ресурсосбережения»  $E(x_1, x_5)$ .

На рис. 2 и 3 отображен поиск решения задачи, в которой следовало компромиссно максимизировать  $R_{PL}$  и  $R_{PH}$ , стремясь обеспечить одинаковую стойкость композиций в разных средах.

На начальном этапе («1-0») 1-ой итерации генерированы 10000 равномерно распределенных в  $\Omega_x$  случайных векторов  $\mathbf{x}$  (по 5 нормализованных координат состава в интервале от  $-1$  до  $+1$ , рис. 3), к которым добавлены  $2^5 = 32$  вершины этого 5-мерного куба. В каждой из  $N = 10032$  точек по соответствующим моделям оценены уровни полей критериев  $R$ ,  $R_W$ ,  $R_{PL}$ ,  $R_{PH}$ ,  $\eta$  и рассчитан уровень  $E$ .

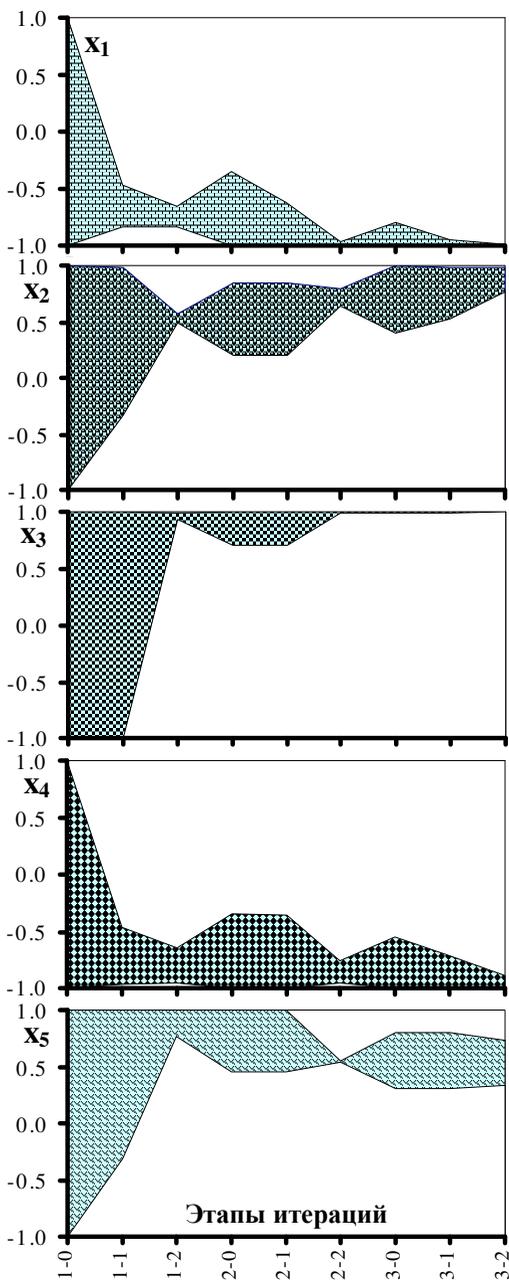


На этапе «1-1» после сортировки точек (вариантов составов по значениям критериев) исключаются те из них, у которых оказываются неприемлемыми уровни  $R < 25$ ,  $R_W$ ,  $R_{PL}$ ,  $R_{PH} < 20$  МПа (рис. 2) и  $\eta$  вне заданного интервала. Оставшиеся точки попадают в область допустимых решений  $\Omega_{1-1}$  (рис. 3).

На последнем этапе итерации («1-2») нижние уровни критериев оптимальности  $R_{PL}$  и  $R_{PH}$  повышаются (рис. 2), исключаются варианты, не удовлетворяющие новым требованиям (рис. 3), допустимая область таким образом сокращается (до  $\Omega_{1-2} < \Omega_{1-1}$ ).

На начальном этапе каждой следующей итерации границы области поиска по каждой координате расширяются на 0.1-0.2 относительно достигнутых границ (рис. 3), что может привести к выходу критериев за уровень ограничений. Так на этапе «2-0» ниж-

Рис. 2. Изменения диапазонов критериев качества на этапах поиска компромисса



ний уровень  $R_{PH}$  (рис. 2) оказывается менее 18 МПа (ниже требуемых 20). К генерированным в новой области точкам (10000) добавляются варианты, оставшиеся после предыдущей итерации (в частности, 3 с этапа «1-2»).

На промежуточных этапах итераций границы допустимой области определяют не исходные требования к критериям, а их улучшенные на предыдущей итерации худшие уровни. В частности, на этапе «3-1» нижнее значение  $R_{PL} = 21.5$  (рис. 2), а не 20 (на «1-1»).

На заключительных этапах выполняется пошаговое приближение к индивидуальным максимумам за счет передвижения вверх нижних границ критериев оптимальности и исключения составов, не попадающих в новые границы. Так на этапе «2-2» удалось поднять и  $R_{PL}$ , и  $R_{PH}$  до 22 МПа (рис. 2).

Усреднение координат лучших точек последней итерации (в дан-

Рис. 3. Изменения границ факторов при поиске

ной задаче 3-ей) дало компромиссные оптимальные значения:

$$x_1 = -0.99, x_2 = 0.88, x_3 = 1.00; x_4 = -0.93, x_5 = 0.51.$$

После возврата к именованным величинам и округления до технически реализуемых значений получены следующие результаты:

- содержание минерального каркаса – 180 м.ч. ( $x_1 = -1$ ),
- доля наполнителя в каркасе 0.85 ( $x_2 = 0.8$ ),
- доля цеолита в наполнителе 0.25 ( $x_3 = +1$ ),
- без крупных зерен ( $x_4 = -1$ ),
- 10 м.ч. фурфурола на 100 м.ч. смолы «Макро» ( $x_5 = 0.6$ ).

Этой композиции (с вязкостью около 220 Па·с) соответствуют:

$$R = 34.3, R_W = 30.6, R_{PL} = 22.0, R_{PH} = 22.5 \text{ МПа},$$

при достаточно большом расходе смолы,  $E = 324.7$  г на кг раствора.

Более экономичные составы, с  $E = 303$  г/кг, дает поиск компромисса между максимумами прочности в легкой и тяжелой нефти и минимумом смолы, т.е. при трех критериях оптимальности:  $R_{PL}$ ,  $R_{PH}$  и  $E$ . Если оказывается достаточным выполнить требование  $R_{PL}, R_{PH} \geq 20$  МПа, то решение задачи минимизации расхода смолы приводит к композициям с  $E = 270$  г/кг.

**Заключение.** Использование метода Монте-Карло и ЭС-моделей для сканирования полей свойств материала с многомерной областью составов позволяет найти композиции, обеспечивающие оптимальный компромисс между несколькими критериями качества.

## Литература

1. Lyashenko T.V., Voznesensky V.A., Novak V.I. et al. Multi-criterion analysis of the influence of composition on the quality of modified epoxy resin polymer concrete. *Polymers in Concrete*. Proc. 3 Southern African Conf., Johannesburg, 1997, p. 157-166.
2. Анализ полей свойств для доказательства специфической роли тонкомолотого цеолита в эпоксидных композитах / Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д., Гара Ан.А. // Вісник ОДАБА. – Одеса, 2004. – Вип. 15. – С. 54-61.
3. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В. ЭС-модели в компьютерном строительном материаловедении. – Одесса: Астропринт, 2006. – 116 с.
4. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д. Компромиссная многофакторная оптимизация гарантированного качества шлакощелочных вяжущих (максимизация прочности и морозостойкости, минимизация расхода ресурса). – Современное промышленное и гражданское строительство. – 2007, т. 3, №1. – С. 5-15.
5. Ляшенко Т.В., Гара Ан.А., Шаршунов А.Б. Анализ влияния многофракционного каркаса на прочность эпоксидных композиций, модифицированных фурфуролом // Современные строительные конструкции из металла и древесины. – Одесса, ОГАСА, 2006. – С. 34-41.
6. Czarnecki L. Repair systems; searching towards compatibility measure. Bonded Concrete Overlays. Proc. Int. RILEM Workshop, Stockholm, 2004. – P. 14-20.

**Компромиссная оптимизация эпоксидных композиций по прочности в разных средах**

*Ляшенко Т.В., Гара Ан.А.*

Экспериментально-статистические модели и вычислительный эксперимент используются для поиска составов эпоксидных композитов, обеспечивающих компромиссно оптимальную прочность при воздействии воды и нефтепродуктов.

**Compromise optimisation of epoxy compositions by strength in various media**

*Lyashenko T.V., Gara An.A.*

Experimental-statistical models and computational experiment are used to find epoxy compositions that would provide compromise optimum of strength when exposed to water and oil.