

Математичні моделі та методи

УДК 691.3

В.А. Аругтюнов, О.В. Старкова, Д.А. Бондаренко

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГИДРОИЗОЛЯЦИОННЫХ СОСТАВОВ ИНТЕГРАЛЬНО-КАПИЛЛЯРНОГО ДЕЙСТВИЯ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН

Представлены математические модели зависимостей прочности и водопоглощения гидроизоляционных составов от содержания полимерных волокон и химических добавок, построенные с использованием алгоритма полного двухфакторного эксперимента.

Ключеві слова: математическая модель, поверхности отклика, гидроизоляционный состав, полимерные волокна.

Постановка проблемы; анализ исследований и публикаций

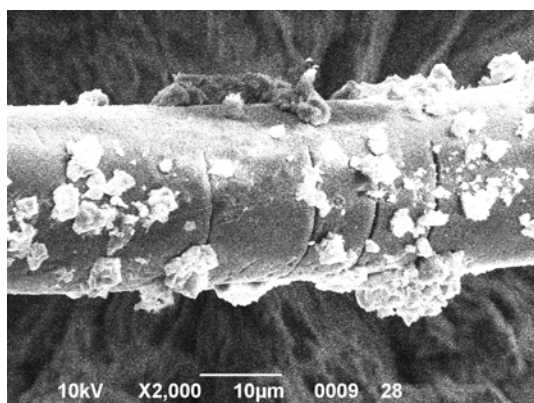
При подборе составов гидроизоляционных покрытий на основе цементных вяжущих интегрально-капиллярного действия необходимо очень точно подбирать ингредиенты в количественном соотношении.

Выбор и количество химически активных добавок позволяет дополнительно синтезировать в поровом пространстве цементного камня кристаллогидраты, аналогичные кристаллогидратам цементного камня, закрывая капилляры для доступа воды, а волокнистые наполнители позволяют повысить прочность цементного камня на растяжение [1]. Однако избыток волокнистого наполнителя приводит к потере прочных контактных зон между кристалло-

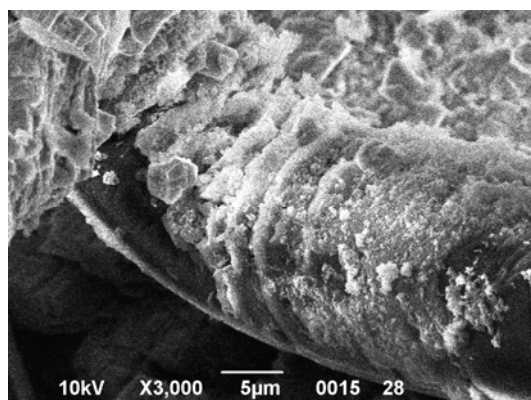
гидратами и волокном (рис. 1), что увеличивает пористость и приводит к потере монолитности структуры и ухудшению гидроизоляционных свойств (рис. 2), а увеличение химически активных добавок в составах приводит к нерентабельности применения таких составов.

Из рис. 1 видно, что с повышением содержания волокна 6 % при одинаковом значении химически активной добавки количество участков, непокрытых кристаллическими образованиями (состав а), намного больше, чем в составе с содержанием волокна 3 % (состав б).

Целью настоящей статьи является исследование возможности получения гидроизоляционных составов интегрально-капиллярного действия на цементной основе с повышенным содержанием полимерного волокна.



а



б

Рис. 1. Полиэфирное волокно в структуре цементного камня гидроизоляционного состава интегрально-капиллярного действия: а – состав на 28 сутки твердения с фиксированным содержанием химически активной добавки (5%) и повышенным содержанием волокна (6%); б – состав на 28 сутки твердения с фиксированным содержанием химически активной добавки (5%) и содержанием волокна (3%)

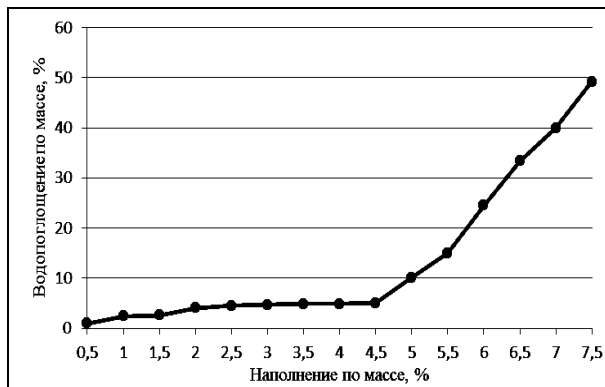


Рис. 2. Зависимость водопоглощения гидроизоляционного состава интегрально-капиллярного действия (с фиксированным содержанием химически-активной добавки) от его наполнения полиэфирным волокном [2]

Основной материал

Для решения задачи по оптимизации гидроизоляционного состава интегрально-капиллярного действия на основе портландского цемента, в состав которого, кроме активных химических добавок входил также волокнистый полимерный наполнитель, был использован бланк алгоритма полного двухфакторного эксперимента (ПФЭ-3²) с двумя сериями опытов. Оптимизация состава выполнена при помощи метода активного планирования эксперимента. Поскольку в материаловедении и технологии базовыми экспериментально-статистическими моделями являются полиномиальные модели второго порядка, то для описания исследуемого состава в любой точке области эксперимента использовали полиномы второго порядка [3 – 5].

$$\hat{Y} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i < j} a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \varepsilon(x^2),$$

где \hat{Y} – параметр оптимизации; $x_i - x_n$ – переменные параметры; a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} – коэффициенты уравнения регрессии.

Эксперимент проводили с помощью ортогональных планов второго порядка, отличающихся минимальным числом опытов, простотой вычисления коэффициентов уравнения и независимостью их определения. Эксперименты проводили двумя дублирующими сериями по 6 образцов в каждом эксперименте. Полученные уравнения регрессии проверяли на адекватность по дисперсионному отношению Фишера [4]:

$$F^{\text{ЭК}} = S_{\text{ад.}}^2 / S_{\text{воспр.}}^2,$$

где $S_{\text{ад.}}^2 = \frac{1}{f_i} \sum_j (y_{uj}^{\text{ЭК}} - y_{uj}^{\text{получ}})^2$;

$$S_{\text{воспр.}}^2 = \frac{1}{f_i} \sum \sum (y_{ui}^{\text{ЭК}} - y_{ui}^{\text{ЭК}})^2.$$

При сравнении с критическим значением F^T [5] в случае $F^{\text{ЭК}} < F^T$ адекватность полученного уравнения подтверждается. Проверку критических значе-

ний коэффициентов $b_{кр}$ при двухстороннем риске 0,05 производили по формуле:

$$(b_i)_{кр} = t \cdot T_i \cdot S_{\sigma}.$$

При $b > b_{кр}$ – коэффициент статистически значим с вероятностью 95% [5].

За переменный параметр X_1 принято процентное содержание химически активной добавки по отношению к цементу, а за X_2 процентное содержание полимерного волокна по отношению к цементу. Пределы X_1 и X_2 ограничены условиями задачи: $3 < X_1 < 9$; $0,1 < X_2 < 0,6$. Шаг варьирования для X_1 равен 1, а для X_2 – 0,1. В экспериментально-статистическом моделировании принято переходить к безразмерным переменным:

$$x_i = (x_i - x_{0i}) / \Delta x_i,$$

где $\Delta x_i = 0,5 (x_{i \max} - x_{i \min})$; $x_{0i} = 0,5 (x_{i \max} + x_{i \min})$.

В ходе эксперимента было проведено количество опытов $N = 9$ с числом повторений каждого $m = 2$. Данные для планирования эксперимента приведены в табл. 1.

Зависимость прочности на растяжение при изгибе от содержания химически активной добавки X_1 и полимерного волокна X_2 имеет вид:

$$Y_1 = 11,5 - 1,4 \cdot X_1^2 + 3,5 \cdot X_1 - 5,45 \cdot X_2^2 + 0,92 \cdot X_2 + 0,9 \cdot X_1 \cdot X_2.$$

Общий вид поверхности отклика уравнения Y_1 построен средствами пакета Statistica 6.0 и представлен на рис. 3. Из рис. 3 видно, что поверхность отклика зависимости прочности на растяжение при изгибе представляет собой эллиптический параболоид и, следовательно, оптимальные (максимальные) значения \hat{Y}_1 расположены в области полуэллипса с центром в точке (+1; 0).

Зависимость водопоглощения Y_2 от содержания химически активной добавки X_1 и полимерного волокна X_2 имеет вид:

$$Y_2 = 3,29 - 0,33 \cdot X_1^2 - 2,2 \cdot X_1 + 1,12 \cdot X_2^2 + 0,42 \cdot X_2.$$

Общий вид поверхности отклика уравнения Y_2 представлен на рис. 4. Из рис. 4 видно, что поверхность отклика зависимости водопоглощения представляет собой гиперболический параболоид и, следовательно, оптимальные (минимальные) значения \hat{Y}_2 расположены в области с центром в точке (+1; 0).

Из оптимизированного по содержанию добавок (химически активных и полимерного волокна) были изготовлены образцы балочек 4×4×16 см и на 28 суток влажного твердения испытаны на растяжение при изгибе, а после высушивания до постоянной массы и на водопоглощение. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Выводы

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что методом математического планирования эксперимента, подобрано оптимальное соотношение полимерного волокна и комплексной хими-

Таблица 1

Данные для планирования эксперимента

| Номер эксперимента | Значения переменных в нормированных величинах | | Значения в натуральных величинах | | | |
|--------------------|---|-------|---|---------------------------------------|--|---------------------------|
| | | | предел прочности при изгибе, Y_1 , МПа (среднее по двум опытам) | добавка химически активная, X_1 , % | добавка полимерного волокна, X_2 , % | водопоглощение, Y_2 , % |
| | X_1 | X_2 | | | | |
| 1 | -1 | -1 | 2,9 | 3 | 0,1 | 5,8 |
| 2 | -1 | 0 | 2,8 | 3 | 0,3 | 6,0 |
| 3 | -1 | +1 | 3,1 | 3 | 0,6 | 5,9 |
| 4 | 0 | -1 | 3,0 | 6 | 0,1 | 4,0 |
| 5 | 0 | 0 | 16,1 | 6 | 0,3 | 1,8 |
| 6 | 0 | +1 | 4,5 | 6 | 0,6 | 6,3 |
| 7 | +1 | -1 | 6,7 | 9 | 0,1 | 1,5 |
| 8 | +1 | 0 | 12,8 | 9 | 0,3 | 1,4 |
| 9 | +1 | +1 | 10,5 | 9 | 0,6 | 1,6 |

Таблица 2

Результаты испытаний образцов после оптимизации состава

| Наименование образцов | Водопоглощение по массе, W , % (из двух серий) | Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа (среднее арифметическое из двух серий) |
|---|--|---|
| Контрольный состав без добавок полиэфирного волокна и химически активной добавки | 6,30 | 4,7 |
| Состав после оптимизации: содержание полиэфирного волокна - 0,6 % по объему, содержание химически активной добавки 5 % от массы цемента | 1,45 | 15,2 |

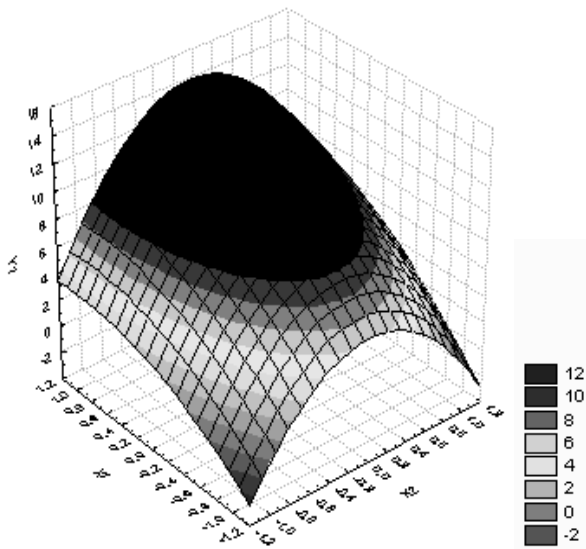


Рис. 3. Поверхность отклика уравнения Y_1 (зависимости прочности на растяжение при изгибе от содержания химически активной добавки X_1 и полиэфирного волокна X_2)

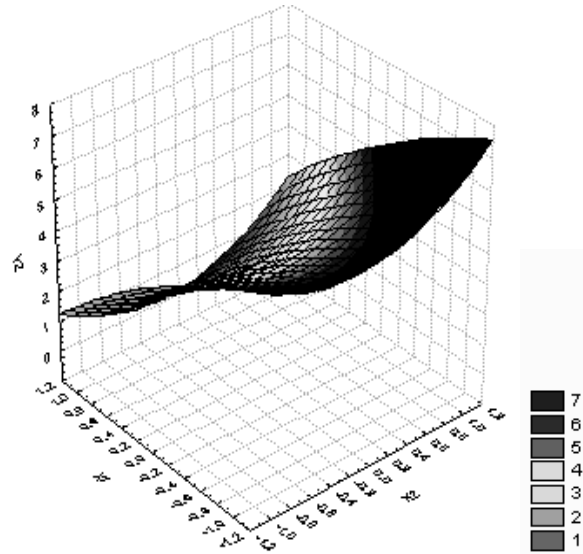


Рис. 4. Поверхность отклика уравнения Y_2 (зависимость водопоглощения от содержания химически активной добавки X_1 и полиэфирного волокна X_2)

мической добавки. При этом сохраняются высокие показатели прочности, а водопоглощение, характеризующее наличие капиллярной пористости, остается минимальным.

Список литературы

1. Плугин А.А. Изотропное микроармирование цементного камня продуктами гидратации для повышения физико-механических характеристик гидроизоляционных

покрытий / А.А. Плугин, М.Г. Салия, Т.А. Костюк // Вісник НТУ «ХП». – X.: НТУ «ХП», 2011. – № 50. – С. 97-103.

2. Возможности применения полимерной микрофибры в гидроизоляционных цементных составах / А.А. Плугин, В.А. Арутюнов, Т.А. Костюк, Д.А. Бондаренко // Материалы IX Межд. НПК «Дни науки - 2013». – Прага: Изд. дом «Образование и наука», 2013. – Т. 32. – С. 79-85.

3. Вознесенский В.А. Оптимизация состава многокомпонентных добавок в композиты / В.А. Вознесенский. – К.: Знание, 1981. – 201 с.

4. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительного-технологических задач на ЭВМ / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Б.А.Огарков. – К.: Вища школа, 1984. – 328 с.

статистика, 1981. – 263 с.

Поступила в редколлегию 23.03.2013

5. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В.А. Вознесенский. – М.: Финансы и

Рецензент д-р техн. наук, проф. А.Г. Вандоловский, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков.

МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ГІДРОІЗОЛЯЦІЙНИХ СКЛАДІВ ІНТЕГРАЛЬНО-КАПІЛЯРНОЇ ДІЇ З ПІДВИЩЕНИМ ВІСТОМ ПОЛІМЕРНИХ ВОЛОКОН

В.А. Арутюнов, О.В. Старкова, Д.О. Бондаренко

Представлено математичні моделі залежностей міцності і водопоглинання гідроізоляційних складів від змісту полімерних волокон і хімічних добавок, побудовані з використанням алгоритму повного двофакторного експерименту.

Ключові слова: математична модель, поверхні відклику, гідроізоляційний склад, полімерні волокна.

SIMULATION OF OPTIMAL INTEGRAL-WATERPROOFING COMPOUNDS CAPILLARY ACTION WITH A HIGH CONTENT OF POLYMER

V.A. Arutunov, O.V. Starkova, D.O. Bondarenko

Mathematical models dependency strength and waterproofing compounds from water absorption of the polymer fibers and chemical additives, construct with the algorithm complete two-factor experiment.

Keywords: mathematical model, response surfaces, waterproofing structure, polymeric fibers.