

УДК 539.4.01

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

И. Я. БЯЛЕР, Н. Н. КРУГЛИЦКИЙ, В. В. ГОНЧАРОВ, В. П. БАТЮК

О ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВАХ ПРОЧНОСТИ СВЯЗНЫХ СТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

(Представлено академиком П. А. Ребиндером 28 VI 1972)

К полидисперсным композициям относятся различные бетоны, строительные растворы, пластмассы и другие аналогичные материалы. Механическая прочность таких композиций, особенно при действии динамических и растягивающих нагрузок, зависит от величин местных напряжений, возникающих в связующем материале ⁽¹⁾. Природа этих явлений может быть выявлена при рассмотрении соответствующей модели, которая в определенном приближении могла бы отразить механизм поведения рассматриваемых композиций. Впервые расчетная модель такой композиции в виде плоскости с подкрепленным отверстием была рассмотрена в работе ⁽²⁾, что

дало возможность выяснить роль прочностных характеристик заполнителей в полидисперсных системах связных композиций.

В развитие теоретических положений ⁽²⁾ предлагается рассмотреть модель в виде упругой или упруго-пластичной многосвязной области — плоскости, ослабленной подкрепленными и неподкрепленными отверстиями различной формы ^(3, 4). Под подкрепляющим элементом следует понимать частицы заполнителя, а под неподкрепленным отверстием — поры или пустоты в изучаемой композиции.

Нахождение напряженного состояния в плоскости, ослабленной отверстиями, связано с решением задачи теории упругости (пластичности) для многосвязной области,

Рис. 1. Модель связной структурированной полидисперсной композиции

контуры которой $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n, L_{n+1}$, причем контур L_{n+1} вынесен на бесконечность (рис. 1). К таким контурам приложены некоторые силы, под воздействием которых тело находится в состоянии равновесия. Нормальное усилие N_2 в связующем материале при линейно-напряженном состоянии ⁽⁵⁾ будет

$$N_2 = N_1 - \sum_{i=1}^n T_i, \quad (1)$$

где N_1 — нормальная сила, действующая в элементе, T_i — усилие, воспринимаемое частицей заполнителя, которое определяется как ⁽⁶⁾

$$T_i = \bar{\sigma} D (P_0 + 1/3 q_0), \quad (2)$$

D — приведенный диаметр заполнителя, $\bar{\sigma}$ — среднее нормальное напряже-

ние по сечению элемента, p_0 и q_0 — коэффициенты,

$$p_0 = 1 / \left(1 - \mu + \frac{E}{E_0} \right); \quad q_0 = 4 / \left(3 - \mu \frac{8}{3} \frac{E}{E_0} \right),$$

E , μ — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона связующего материала, E_0 — модуль упругости заполнителя.

Как видно из формулы (1), соответствующим подбором компонентов композиции можно достигнуть минимальных усилий в связующем материале. В этом случае основную часть усилий будут воспринимать частицы заполнителя, обладающие значительно большей прочностью, чем затвердевшее вяжущее. Это теоретически раскрывает причину возможности получения высокопрочного, абсолютно водонепроницаемого, морозостойкого и долговечного песчаного бетона (^{7, 8}) и других дисперсных материалов. Расчетной моделью таких высокоэффективных материалов будет плоскость, ослабленная подкрепленными отверстиями. Так, например, при малых значениях E/E_0 и расстояний между частицами заполнителя $a < 1,6D$, $p_0 = 1,2$; $q_0 = 1,4$,

$$\Sigma T_i = 1,67D\sigma > N, \quad (3)$$

т. е. возникающие усилия полностью воспринимают заполнитель. Кроме того, повышение пластических свойств материала вяжущего без снижения его прочности улучшает работу композиции в целом. Это указывает на эффективность включения в состав такой композиции органики — длинноцепочечных полимеров.

На основании этих исследований можно заключить, что напряженное состояние структурированных полидисперсных связных композиций определяется степенью их объемного насыщения заполненными и незаполненными полостями, их величиной, формой, расстоянием между ними, модулем упругости подкрепляющего материала, адгезией вяжущего к нему и другими факторами.

Рассмотрим влияние каждого из них на напряженное состояние изучаемых композиций.

а) Форма полости или частицы заполнителя (наполнителя). В результате прохождения в вяжущих седиментационных процессах в материалах могут образовываться микротрещины. Напряжения будут равны по контуру трещины при действии растягивающих сил в материале элемента

$$\sigma = \bar{\sigma} (1 + 2a/b). \quad (4)$$

Ослабления напряжения в материале при действии сил давления, приложенных по контуру, определяются по формуле

$$\sigma_0 = \frac{p}{\Delta_1} [2m (\cos 2\theta - m) + (1 - m^2)], \quad (5)$$

где

$$\Delta_1 = 1 - 2m \cos 2\theta + m^2, \quad m = (a - b) / (a + b); \quad (6)$$

p — давление по контуру ослабления (трещины), a , b — длина и ширина ослабления.

Для отверстия круговой формы формула (4) примет вид

$$\sigma_0 = p. \quad (7)$$

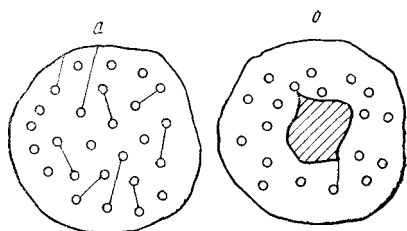


Рис. 2. Пузырьки — элементы уменьшения роли концентраторов напряжений: а — при трещинообразовании, б — на острых краях заполнителей

Степень концентрации напряжений, как известно, зависит и от длины трещин. Так, например, трещина длиной в 2м с радиусом кривизны ее кончика 1 Å повышает напряжение у него в 200 раз. Таким образом, с целью уменьшения концентрации напряжений в композициях с ожидаемым микротрещинообразованием кончики трещин следует округлять, перехватывая их различного рода ловушками в виде пузырьков вовлеченного воздуха или поверхностями раздела, представленными органической частью. В этом смысле положительное влияние окажут поверхностно-активные вещества (рис. 2).

С точки зрения возникновения концентраторов напряжений заполнитель в рассматриваемых композициях должен быть правильной округлой формы, без острых углов.

б) Подкрепляющий материал полости. При соотношении модулей упругости материала подкрепления (заполнителя) и связующего, равном 5—10, величины напряжений уменьшаются в 3—4 раза по сравнению со средними напряжениями в однородной системе. Это также объясняет высокую прочность связных структурированных композиций (бетонов) при правильном выборе материала заполнителя (см. табл. 1).

Таблица 1

Напряжения, возникающие в полидисперсной композиции с подкрепляющими элементами из другого материала

$\frac{E_0}{E}$	0	45°	90°	0	45°	90°
	1			2		
0,5	—0,364	0,646	1,646	1,110	0,646	0,181
1,0	0,046	1,500	1,000	0,750	0,500	0,250
3	0,176	0,310	0,444	0,280	0,310	0,340
5	0,220	0,250	0,295	0,157	0,250	0,352
10	0,271	0,205	0,239	—0,020	0,205	0,420
∞	0,276	0,150	0,020	—0,605	0,150	0,905

Примечание. 1 — подкрепляющий элемент адгезионно связан с вяжущим, 2 — не связан.

в) Адгезия. При хорошей адгезии вяжущего к заполнителю величина напряжений в связующем материале на 40—50% меньше, чем при ее отсутствии (см. табл. 1). Следовательно, шероховатость поверхности заполнителя или наличие у него эпитаксических связей с вяжущим увеличивает прочность композиции, что хорошо согласуется с результатами исследований⁽⁸⁾.

г) Расстояние между частицами заполнителя. При расстояниях между подкрепленными полостями более 1,25 их диаметра расчетными напряжениями являются средние напряжения в связующем материале, а при меньших расстояниях — расчетные напряжения значительно уменьшаются^(5, 6). Однако при касании подкрепленных полостей величины напряжений значительно возрастают. Это также раскрывает причину повышения прочности клеевых прослоек с уменьшением их толщины⁽⁶⁾.

д) Способность вяжущего изменять свой объем. При некотором уменьшении объема вяжущего происходит обжатие подкрепляющего материала полостей (заполнителя, наполнителя). Введение мелкого заполнителя в композицию наряду с более крупным уменьшает величину возникающих усилий в вяжущем материале. В этом случае композиция как бы превращается в предварительно напряженную, что значительно уменьшает величину расчетных напряжений. Это еще раз объясняет полезность заполнителя в предотвращении усадочного трещинообразования в рассматриваемых композициях.

Снижения хрупкости материала можно также добиться путем введения очень малых количеств добавок длинноцепочечных полимеров с большим молекулярным весом и длинной углеродной цепью атомов. Такие вещества будут армировать систему, превращая ее в минерально-органическую — аналог природных моделей.

Изложенные выше некоторые теоретические предпосылки, выдвинутые на основании использования ряда положений механики твердого тела и физико-химической механики ⁽¹⁰⁾, достаточно хорошо подтверждаются многолетними экспериментальными исследованиями прочности бетонов, полимербетонов и других связных полидисперсных композиций.

Институт коллоидной химии и химии воды
Академии наук УССР
Киев

Поступило
12 VI 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ И. Я. Берг, Физические основы теории прочности бетона и железобетона, М., 1962. ² В. Г. Пашковский, Н. В. Михайлов, П. А. Ребиндер, ДАН, 171, № 4, 841 (1966). ³ Н. И. Мухелишвили, Некоторые основные задачи математической теории упругости, М., 1966. ⁴ Г. Н. Савин, Распределение напряжений около отверстий, Киев, 1968. ⁵ И. Я. Бялер, ДАН, 74, № 3, 433 (1950). ⁶ И. Я. Бялер, В сборн. Исследования по теории сооружений, в. 12, М., 1963. ⁷ П. А. Ребиндер, Вестн. АН СССР, № 8, 28 (1964). ⁸ П. А. Ребиндер, Н. В. Михайлов, Вестн. АН СССР, № 10, 70 (1961). ⁹ Н. Б. Урьев, Н. В. Михайлов, П. А. Ребиндер, ДАН, 164, № 3, 628 (1965). ¹⁰ П. А. Ребиндер, Физико-химическая механика — новая область науки, М., 1968.