

## РАСЧЕТ ПРОВОДИМОСТИ СТРУКТУР, ОБРАЗОВАННЫХ ДИСКРЕТНЫМИ ПРОВОДЯЩИМИ ВОЛОКНАМИ

Известны резистивные материалы на основе бетонной матрицы, где в роли проводящей фазы выступают химические электропроводные волокна или сочетание их с дисперсным углеродом. Особенность их заключается в том, что достижение эквивалентной с бетэлом [1] проводимости возможно при существенном снижении содержания проводящей фазы.

Теоретический и практический интерес представляет расчет проводимости структур, образованных дискретными волокнами. Для расчета удельного электрического сопротивления композиции воспользуемся следующей упрощенной моделью. Рассмотрим образец из фибронаполненного бетона с размерами  $1 \times 1 \times 1$  м. В случае объемно-произвольного армирования такого образца дискретными волокнами любая секущая плоскость  $\gamma$ , проведенная параллельно его граням, пересечется с  $M$  из общего  $n$  количества волокон, где  $M$  можно рассматривать как математическое ожидание пересечения плоскости  $\gamma$  средним количеством волокон длиной  $2l$  под произвольными углами  $\alpha$  [2].

Величину  $M$  будем искать в виде [2]:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (1)$$

где  $n$  — количество волокон в объеме образца, шт.;  $M_i$  — математическое ожидание пересечения одним волокном плоскости  $\gamma$ .

Исходя из этих условий, получена формула

$$M = ln/L, \quad (2)$$

где  $L$  — размер образца в рассматриваемом направлении, м.

Так как значение  $M$  найдено для произвольного сечения, то можно считать, что оно справедливо и для других сечений образца. Далее предполагаем, что в любом сечении образца волокна попарно контактируют друг с другом, т. е. образуются непрерывные цепочки по трем взаимно перпендикулярным направлениям, на выстраивание которых вдоль каждого направления идет  $M$  всех волокон. Тогда общее количество цепочек в каждом сечении образца будет составлять

$$N = M = ln/L. \quad (3)$$

Так как  $L = 1$  м, то

$$N = ln. \quad (4)$$

Учитывая, что  $n = 2V_b/(\pi d^2 l)$ , выражение (4) приобретет вид

$$N = 2V_b/(\pi d^2) = 2\delta_b/(\pi d^2), \quad (5)$$

где  $V_b$  — объем образца, равный  $1$  м<sup>3</sup>;  $d$  — диаметр штапельки волокна, м;  $\delta_b$  — объемное содержание волокна, доля единицы.

Удельное электрическое сопротивление  $\rho$  материала в соответствии с принятой моделью будет состоять из трех составляющих: сопро-

тивления  $\rho_1$  собственно волокон, сопротивления  $\rho_2$ , являющегося суммой контактных сопротивлений  $R_k$  между волокнами, обусловленных уплотнением линий тока у контактных пятен [3], и  $\rho_3$  — туннельного сопротивления, обусловленного расстоянием носителей в момент преодоления ими потенциального барьера между волокнами полупроводника из-за наличия на их поверхности адсорбированных ими окисных пленок [4], поверхностных состояний или зазора между ними [3, 5].

Таким образом,

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3. \quad (6)$$

Определим составляющие выражения (6). Если пренебречь контактными сопротивлениями между волокнами, т. е. предположить, что цепочки превратились в сплошной проводник той же длины и с тем же содержанием материала, т. е. в один проводник длиной 1 м, то площадь его поперечного сечения будет

$$\frac{2\delta_b \pi d^2}{\pi d^2 4} = \delta_b/2.$$

При этом удельное электрическое сопротивление  $\rho_1$  материала будет равно

$$\rho_1 = 2\rho_n/\delta_b, \quad (7)$$

где  $\rho_n$  — удельное электрическое сопротивление материала проводника, Ом·м.

Величина  $\rho_2$  определяется суммой контактных сопротивлений между волокнами:

$$\rho_2 = R_k n'/N, \quad (8)$$

где  $R_k$  — контактное сопротивление между соседними волокнами, Ом;  $n'$  — число волокон длиной  $2l$  на длине  $L=1$  м;  $N$  — число цепочек в поперечном сечении образца площадью 1 м<sup>2</sup>.

Число волокон  $n'$  определяем как

$$n' = L/(2Al) = 1/(2Al),$$

где  $A$  — численное значение некоторой функции распределения волокон  $f(\alpha)$  относительно величины  $\alpha$ , учитывающее ту часть волокон  $M$ , которая дает составляющую на нормаль к плоскости  $\gamma$ . Величина  $A$  может быть оценена величиной 0,5 [6]. Тогда

$$\rho_2 = \frac{R_k \pi d^2}{l 2\delta_b}. \quad (9)$$

Контактное сопротивление  $R_k$  с определенными допущениями можно определить, пользуясь (6)

$$R_k = \rho_n/(2a), \quad (10)$$

где  $a$  — радиус контактного пятна, м.

Радиус контактного пятна определяли по формуле Герца [7] с учетом того, что коэффициент Пуассона материала волокон  $\mu=0,5$  [8]. В итоге получено

$$\rho_2 = 2,2\rho_n d^2 \sqrt[3]{E/(Pd)} / (\delta_b l), \quad (11)$$

где  $P$  — усилие в контактах, Н;  $d$  — диаметр штапельки волокон, м;  $E$  — модуль упругости материала волокон, Н/м<sup>2</sup>.

Туннельная составляющая  $\rho_3$  общего сопротивления композиции является величиной переменной [5] и может быть найдена только в простейших случаях [7], поэтому с учетом данных литературы [9] она принята равной  $\rho_2$ .

Тогда

$$\rho = \rho_1 + 2\rho_2. \quad (12)$$

В табл. 1 приведены расчетные и экспериментальные данные объемных резисторов, изготовленных в виде образцов-балочек с размерами  $40 \times 40 \times 160$  мм из смесей, составы которых приведены в табл. 2.

Из каждого состава смеси изготавливалось по три резистора. Приготовление смеси производилось согласно ГОСТ 310.4—76 вручную, а затем в бегунковой мешалке. Формирование образцов выполнено на виброплощадке со стандартными параметрами. Резисторы твердели в воде в нормальных условиях в течение 28 сут, после чего высушивались до постоянной массы и подвергались испытаниям, при которых определялось их электрическое сопротивление в соответствии с методикой [10] под нагрузкой 10 кН.

Из приведенных в табл. 1 данных следует, что предложенная методика расчета проводимости структур, образованных дискретными

Таблица 1

Номер состава	Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	
	Экспериментальное значение	Расчетное по формуле (12)
1	583,8	607,1
2	691,3	513,8

Таблица 2

Состав смеси, % объема	Номер состава	
	1	2
Штапельное волокно «Углен-9», содержащее в штапельке 720 единичных волокон $\varnothing 13$ мкм длиной $2l=4$ мм.	1,64	1,90
Портландцемент марки 300 ГОСТ 10178—76	16,44	15,60
Вольский песок ГОСТ 6139—78	58,50	55,50
Вода, остальное	23,42	27,00

волокнами, находится в удовлетворительном согласии с экспериментальными данными и может применяться на практике для проведения оценочных расчетов.

Значения  $\rho$  по выражению (12) получены в предположении, что штапельки в процессе приготовления смеси не распадаются на единичные волокна, тогда как в реальных условиях это имеет место, как и другой процесс — комкование волокон. В зависимости от того, какой процесс будет превалировать, в ту или иную сторону произойдет в реальных условиях смещение величины  $\rho$ .

Следовательно, для уменьшения  $\rho$  необходимо стремиться к устранению комкования волокон и их дефибрилляции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добжинский М. С. Проводящие композиционные материалы на основе цементной связки // Электрические бетоны / Тр. СибНИИЭ.— Новосибирск: СО РАН 1964.— С. 57—72.
2. Черепкова Н. Г., Кромская Н. Ф. Теория распределения фибровой арматуры в бетонной смеси // Изв. вузов. Строительство и архитектура.— 1981.— № 9.— С. 30—32.
3. Гуль В. Е., Голубева М. Г. Коллид/ж.— 1967.— Т. 29.— № 1.— С. 62—68.
4. Киселев П. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках.— М.: Наука, 1970.— 399 с.
5. Добжинский М. С. Механизм рассеяния электрической энергии в объемных резисторах // Электрофизические процессы в электротехнических материалах.— М.: Энергия, 1975.— С. 68—78.
6. Рабинович Ф. Н. Об уровнях дисперсного армирования бетонов // Изв. вузов. Строительство и архитектура.— 1981.— № 11.— С. 17—19.
7. Хольм Р. Электрические контакты (Пер. с англ.).— М.: ИЛ, 1964.— 464 с.
8. Зайчиков С. Г., Ветров А. И. Углеволокнистые материалы.— М.: Информэлектро, 1977.— 16 с.
9. Гальперин Б. С. Непроволочные резисторы.— Л.: Энергия, 1968.— 284 с.
10. Врублевский Л. Е. и др. О методе проектирования электропроводного бетона // Вопросы гидротехники / Сб. тр. НИИВТ.— Вып. 38.— Новосибирск: НИИВТ, 1968.— С. 83—89.