

В. Г. БАБАК, Е. А. АМЕЛИНА, Е. Д. ЩУКИН,

академик П. А. РЕБИНДЕГ

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЧНОСТИ ДИСПЕРСНОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ОТ ЧИСЛА И ПРОЧНОСТИ КОНТАКТОВ

Развитие физико-химической теории прочности дисперсных пористых тел требует детального изучения связи между прочностью дисперсной структуры и такими ее параметрами, как пористость, гранулометрический состав, механические свойства твердой фазы, сила сцепления между частицами в местах контакта (прочность контакта), а также вид напряженного состояния и объем образцов при испытании на прочность. Изучению такой зависимости были посвящены многочисленные работы в области порошковой металлургии (¹⁻⁶), твердения мономинеральных вяжущих веществ (^{7, 8}), тонкодисперсных пористых катализаторов и сорбентов (^{9, 10}). Ранее (¹) были сформулированы задачи, стоящие перед физико-химической теорией прочности пористых тел, и намечены пути дальнейшего ее развития. Отмечается, что прочность дисперсного пористого тела P_c является функцией средней прочности контактов между частицами \bar{p}_1 и числа контактов, приходящихся на единицу контактного сечения χ , что является принципиально новым подходом к оценке прочности пористых структур. Предложенная формула $P_c = \bar{p}_1 \chi$ была применена для оценки сил сцепления в фазовых контактах (прочности индивидуальных контактов) по результатам измерения макропрочности дисперсных пористых тел (^{12, 14}), что достаточно хорошо согласуется с результатами непосредственного измерения сил сцепления в контактах между отдельными кристалликами по методике, предложенной в (¹³).

В данной работе проведено прямое экспериментальное определение величин P_c , \bar{p}_1 и χ и их сопоставление на примере модельной пористой глобулярной структуры, полученной спеканием монодисперсных сферических частиц суспензионного полистирола.

Для пористых материалов характерен значительный разброс значений прочности, который связан с одновременным воздействием на нее различных трудно контролируемых факторов, что существенно осложняет обработку экспериментальных данных. Поэтому целесообразно использовать идеализированные модели пористых материалов, так как они позволяют дифференцировать влияние на прочность различных параметров. Выбранный нами модельный материал (суспензионный полистирол) обладает свойствами, делающими его удобным объектом для подобного рода исследований. Сферическая форма частиц полистирола позволяет исключить влияние фактора формы частиц на прочность структуры. Фракционирование (на ситах и седиментацией) дало возможность выделить узкие (практически монодисперсные) фракции частиц для получения моно- и полидисперсных структур с заданным распределением частиц по размерам. Невысокая температура плавления позволила сравнительно легко получить спеканием порошка образцы различной геометрической формы, что дало возможность проводить испытания на прочность в различных напряженных состояниях. Величина средней прочности контактов между частицами варьировалась изменением глубины спекания. Хрупкость полистирола при комнатной температуре и появление пластичности при сравнительно невысоких температурах (до 80°) позволяет мо-

делировать пористые тела с различными механическими свойствами индивидуальными контактами между **частицами**.

Образцы готовились в виде цилиндров длиной 16 см и диаметром 2 см и балочек размером $10 \times 1 \times 1$ см³ спеканием порошка полистирола с радиусом частиц $r = 0,43 \pm 0,05$ мм при температуре 130° в металлических формах. Пористость образцов варьировалась в интервале 34—50%, что достигалось спеканием полистирола с порошком поваренной соли со средним размером частиц 0,3 мм и последующим вымыванием ее из образцов. Значение пористости Π образцов находилось на основании изме-

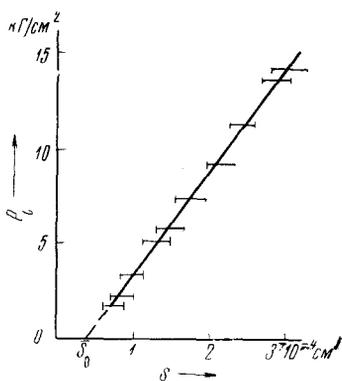


Рис. 1. Зависимость прочности образцов от средней площади контактов

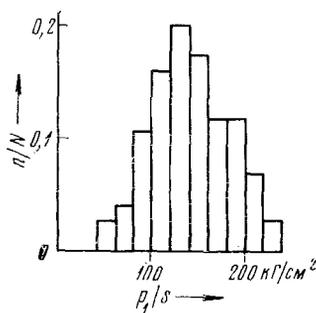


Рис. 2. Гистограмма распределения величины p_1/s

рения массы m и объема V по формуле $\Pi = (1 - m/\rho V) \cdot 100$ (где ρ — плотность полистирола). Все образцы испытывались на прочность по схеме трехточечного изгиба на приборе МП-2С (ИФХ АН СССР). Исследование поверхности разрушения образцов в микроскоп показало, что разрушение происходило исключительно по местам контактов частиц, представляющих собой круглые плоские площадки. По данным 50 измерений диаметров контактов для каждой поверхности разрушения строилась кривая распределения величины площади s контактов. Измерением времени спекания от 1 до 3,5 часа удавалось получать контакты со средней площадью \bar{s} от $0,5 \cdot 10^{-4}$ до $4 \cdot 10^{-4}$ см² при относительной погрешности измерения \bar{s} не более 5%.

Непосредственное наблюдение показало, что для всех образцов поверхность разрушения нормальна к направлению максимальных растягивающих напряжений, которые являются причиной разрушения структуры. Поэтому временная прочность материала образцов рассчитывалась по формуле $P_c = M_{\max}/W$, где M — момент силы относительно сечения разрушения образца, W — осевой момент сопротивления сечения образца.

Как видно из рис. 1, на котором представлена зависимость P_c от \bar{s} , в исследуемом интервале значений \bar{s} указанная зависимость хорошо описывается линейной функцией $P_c = k_1 (\bar{s} - \bar{s}_0)$. Таким образом, при одинаковых прочих параметрах прочность дисперсной структуры однозначно определяется величиной средней площади контакта \bar{s} . Анализ экспериментальных данных показал, что различие в значении прочности образцов одной партии (полученных спеканием в одинаковых условиях) обусловлено различием в значениях площади \bar{s} . Этот факт был учтен при построении зависимости $P_c(\bar{s})$ (рис. 1).

Для нахождения интересующей нас зависимости P_c от средней прочности индивидуального контакта p_1 были проведены непосредственные измерения сил сцепления между частицами с последующим измерением

площади контактной площадки s . С этой целью две припеченные друг к другу частицы полистирола диаметром 0,6—1,5 мм отрывались одна от другой под действием силы, нормальной к их контактной площадке, что обеспечивалось специальным миниатюрным зажимом и шарнирным подвесом. Усилия (p_1), необходимые для отрыва частиц, измерялись пружинным динамометром, а площадь контактной площадки s измерялась под микроскопом. Результаты измерений представлены на рис. 2 в виде гистограммы распределения прочности материала в контакте на отрыв. Среднее значение p_1/s , среднеквадратичное отклонение распределения p_1/s и

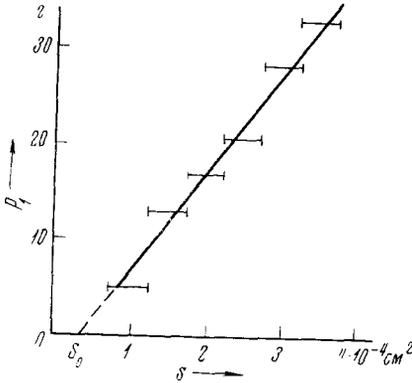


Рис. 3. Зависимость прочности контакта p_1 от его площади s

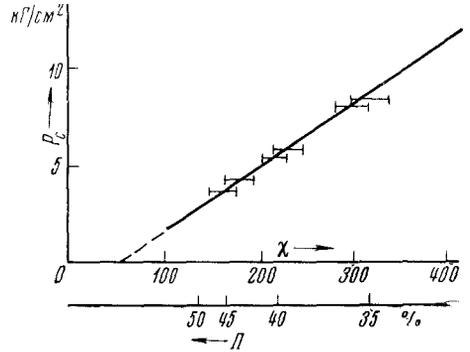


Рис. 4. Зависимость прочности образцов P_c от числа контактов χ

точность измерения среднего значения равны соответственно 150 kg/cm^2 , 60 kg/cm^2 и 3,5%. Обработка результатов опыта показала, что в использованном нешироком интервале размеров частиц среднее значение p_1/s не зависит от радиуса частиц r . На рис. 3 представлена зависимость $p_1(s)$, которая для данного интервала значений s может быть записана как $p_1 = k_2 (s - s_0)$. Так как значения \bar{s} и s_0 оказываются приблизительно равными, зависимость макропрочности P_c от средней прочности контактов p_1 имеет вид $P_c = k p_1$.

Сопоставим экспериментально найденные величины P_c , \bar{p}_1 и χ , исходя из предположения об одновременном разрушении контактов при испытании образцов на прочность. Непосредственный подсчет под микроскопом числа контактов на 1 cm^2 поверхности разрушения у образцов с пористостью $\Pi = 35\%$ дает $\chi = 310 \text{ cm}^{-2}$. При подсчете числа контактов способом, изложенным ранее ⁽¹⁴⁾, получаем $\chi = 300 \text{ cm}^{-2}$. Произведение $\chi \bar{p}_1$ для значения $\bar{s} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ оказывается равным 9 kg/cm^2 . Экспериментальное значение прочности P_c , взятое из рис. 1 для $\bar{s} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$, равно 8,5 kg/cm^2 . Хорошее совпадение значений $\chi \bar{p}_1$ и P_c позволяет считать справедливым в первом приближении соотношение $P_c = \chi \bar{p}_1$.

Хорошее совпадение значений $\chi \bar{p}_1$ и P_c обосновывает в качестве первого приближения соотношение $P_c = \chi \bar{p}_1$, т. е. позволяет считать справедливым представление о преимущественно аддитивном действии связи частиц в контактах. В данной работе впервые экспериментально показана справедливость этого, казалось бы тривиального, соотношения. Действительно, для сплошных твердых тел аддитивность действия всех межатомных связей, т. е. «независимость» их действия друг относительно друга, имеет место в исключительном случае идеальной структуры (теоретическая прочность), в то время как при разрушении реальных сплошных твердых тел в каждый данный момент «работает» лишь малая доля межатомных связей (и значение P_c определяется характером дефектов в структуре). Можно было бы ожидать, что в случае дисперсных пористых

материалов их дефектность приводит к существенной неодновременности разрушения контактов. Тем не менее, проведенные опыты показали, что для дисперсных структур (предельно дефектных твердых тел) наблюдается тенденция к независимости действия сил связи.

Соотношение $P_c = \bar{p}_1 \chi$ остается справедливым в довольно широком интервале значений Π и нарушается при больших для данной структуры значениях пористости ($\sim 60\%$). На рис. 4 представлена зависимость прочности образцов P_c от числа контактов χ , полученная для образцов различной пористости, но имеющих одинаковую среднюю площадь контакта $\bar{s} = 2 \cdot 10^{-4}$ см². Как видно из рис. 4, эта зависимость отклоняется от пропорциональности (на графике пунктирная линия) тем больше, чем больше величина пористости.

Следует полагать, что с увеличением пористости, т. е. с уменьшением числа контактов, приходящихся на одну частицу, влияние дисперсии распределения контактов по прочности на прочность структуры P_c возрастает.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Институт физической химии
Академии наук СССР
Москва

Поступило
7 II 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. Ю. Бальшин, ДАН, 67, № 5, 831 (1949). ² F. P. Knudsen, J. Am. Ceram. Soc., 42, 8, 376 (1959). ³ M. Eudier, Powder Met., 9, 273 (1962). ⁴ P. Mollier, Mem. sci. rev. met., 67, № 6, 401 (1970). ⁵ Г. С. Писаренко, В. Т. Троценко и др., Прочность металлокерамических материалов и сплавов при нормальных и высоких температурах, Киев, 1962. ⁶ J. E. Bailey, N. A. Hill, Proc. Brit. Ceram. Soc., № 15, 15 (1970). ⁷ А. Ф. Полак, Элементарные процессы твердения мономинеральных вяжущих веществ, Тр. Башкирск. н.-и. инст. по строительству, 3, 179 (1963). ⁸ H. N. Vache, J. Am. Ceram. Soc., 53, № 12, 654 (1970). ⁹ П. А. Ребиндер, Е. Д. Щукин, Л. Я. Марголис, ДАН, 154, 695 (1964). ¹⁰ В. А. Дзисько, Д. В. Тарасова, Г. П. Винникова, Кинетика и катализ, 8, в. 1, 193 (1967). ¹¹ Е. Д. Щукин, Кинетика и катализ, 6, в. 4, 641 (1965). ¹² Е. Д. Щукин, Е. А. Амелина и др., ДАН, 191, № 5, 1037 (1970). ¹³ Е. Д. Щукин, Р. К. Юсупов и др., Колл. журн., 31, № 6 (1969). ¹⁴ Е. А. Амелина, Е. Д. Щукин, Колл. журн., 32, № 6, 795 (1970).