

Р. К. ЮСУПОВ, Е. А. АМЕЛИНА, Е. Д. ЩУКИН, академик П. А. РЕБИНДЕР

О ХАРАКТЕРЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛ СЦЕПЛЕНИЯ В КОНТАКТАХ МЕЖДУ КРИСТАЛЛИКАМИ ПРИ ИХ ПОДЖИМЕ

Широкое, в пределах нескольких порядков, распределение сил сцепления в индивидуальных микроскопических контактах между дисперсными частицами — одно из основных свойств контактных взаимодействий. Распределения такого характера наблюдались в модельных экспериментах в ряде исследований адгезии микрочастиц к твердым поверхностям^(1, 2). В качестве причин значительного разброса сил назывались различные факторы: загрязнения поверхности, разная степень электризации частиц, геометрическая неоднородность поверхности — ее микрошероховатость и, наконец, энергетическая неоднородность поверхности — наличие активных центров.

Распределение сил сцепления в контактах между частицами дисперсной фазы является важной характеристикой структуры в дисперсных системах; количественные данные об этом распределении необходимы для развития физико-химической теории прочности пористых дисперсных тел⁽³⁾.

Цель данной работы — исследование контактных взаимодействий между отдельными частицами, в частности, изучение характера распределения сил сцепления, возникающих в контактах между отдельными кристалликами при их поджиге. Измерения сил сцепления в контактах проводились с помощью методики, подробно описанной ранее⁽⁴⁾. Объектами исследования являлись кристаллики нафталина, хлористого натрия и хлористого серебра. Кристаллики нафталина произвольной формы размером в 2—3 мм выкалывались из монокристалла; хлористый натрий использовался в виде нитевидных кристаллов (длиной в несколько миллиметров и толщиной ~ 50 мкм). Образцы AgCl представляли собой поликристаллы со средним размером зерна несколько сот микрон (по данным микроскопического анализа), полученные путем отжига нанесенных на стеклянные палочки (толщиной 1 мм) капель расплава.

На рис. 1 представлены в виде гистограмм логарифмов прочности результаты исследования сил сцепления — прочности контактов p_c . Каждое распределение построено по результатам не менее 100 измерений. В данной серии были проведены также измерения прочности контактов между кристалликами AgCl при их поджиге с усилиями 0,003 и 0,5 дин. Для всех 100 измерений в обоих случаях прочность контактов составила меньше 0,003 дин (гистограммы не приводятся). Время поджига кристалликов всегда было ~ 10 сек.

Из представленных данных видно, что для всех исследованных веществ с увеличением усилия поджига кристалликов наблюдается увеличение прочности контактов. Известно, что при поджиге частиц создаются высокие контактные напряжения, достигающие по своей величине уровня предела текучести материала частиц. Пластические деформации в контактной зоне сопровождаются выходом на поверхность дислокаций и обнажением ювенильных поверхностей, по которым осуществляется сцепление за счет близкодействующих сил, т. е. происходит образование фазового контакта, в котором контактная поверхность подобна границе зерна в поликристаллическом сростке. Как следует из представленных рисунков, при минимальном усилии поджига кристалли-

ков 0,003 дин прочность большинства контактов составляет меньше 0,003 дин. При столь малом усилии остаточные деформации в контакте, по-видимому, не развиваются, и его прочность обуславливается, в основном, дальнедействующими ван-дер-ваальсовыми силами, подобно тому, как это имеет место при адгезии микрочастиц к твердым поверхностям. Такие контакты, в отличие от фазовых, будем называть адгезионными.

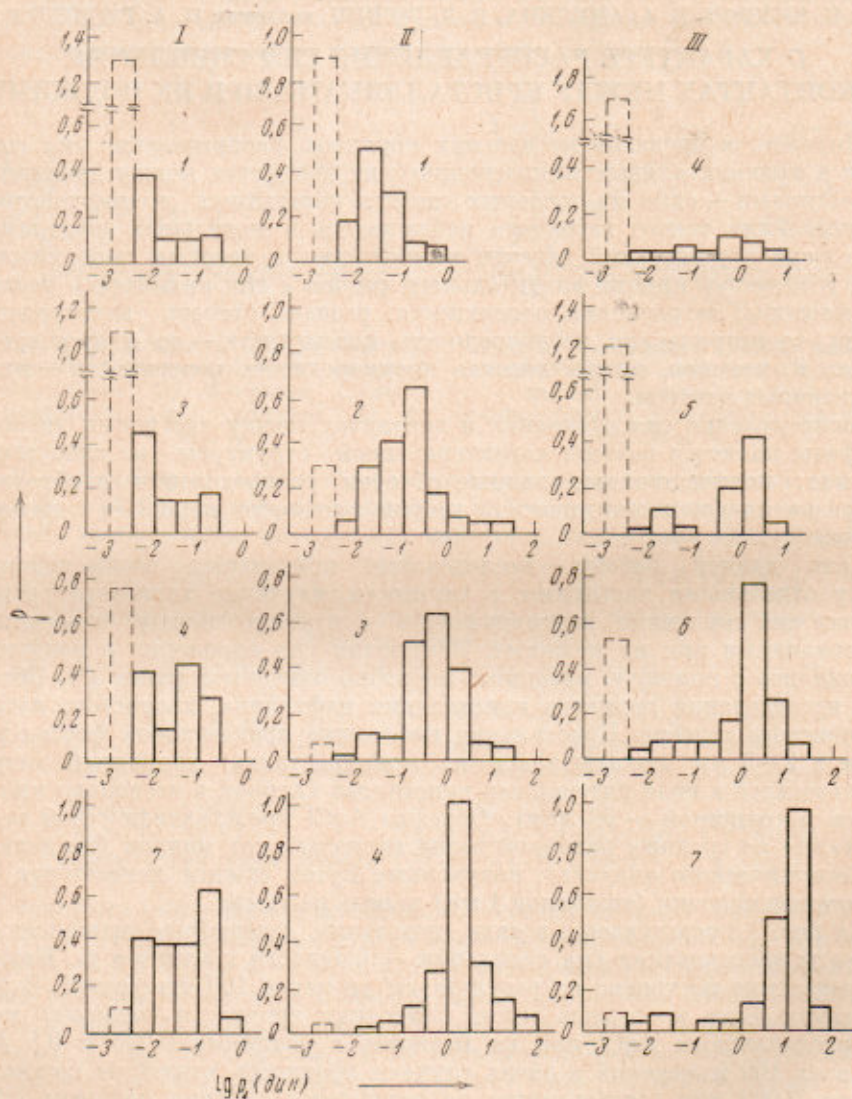


Рис. 1. Зависимость плотности распределения ρ от $\lg p$, между кристалликами нафталина (I), NaCl (II), AgCl (III) при различных условиях их поджима один к другому f (в динах): 1 — 0,003; 2 — 0,05; 3 — 0,5; 4 — 5; 5 — 10; 6 — 20; 7 — 50

Линейный размер контактной поверхности при малых нагрузках в отсутствие остаточных деформаций может быть оценен по Герцу⁽⁵⁾. Такая оценка для ионных кристаллов AgCl при $f = 0,003$ дин в предположении, что средний размер микрошероховатостей составляет доли микрона (радиус закругления контактирующих поверхностей в задаче Герца), приводит к величине всего лишь в несколько десятков Å, что по порядку величины существенно меньше среднего расстояния между

дефектами (дислокациями). При этом вероятность встречи дефекта — зародыша сдвига в зоне контакта мала и для осуществления пластической деформации необходимо создать контактное напряжение, близкое к критическому скалывающему напряжению идеального кристалла. С увеличением усилия поджима растет как величина контактных напряжений, так и площадь упругого контакта; при этом увеличивается также вероятность встречи такого дефекта, на котором зарождение сдвига облегчено.

Действительно, как видно из рис. 1, для всех исследованных кристаллов при некотором критическом усилии поджима f_c' обнаруживается присутствие значительно более прочных (на 2—3 порядка) по сравнению с адгезионными фазовых контактов: на гистограммах появляется новый второй максимум (для нафталина $f_c' \sim 0,05$ дин, для AgCl и NaCl $f_c' \sim 5$ дин). С увеличением усилия поджима кристалликов происходит уменьшение доли адгезионных контактов и увеличение доли фазовых с одновременным смещением нового второго максимума распределения, соответствующего фазовым контактам, в сторону больших значений прочности. Начиная с усилия поджима f_c'' , «слабые» адгезионные контакты практически не обнаруживаются и распределение становится нормально логарифмическим. Для нафталина это наблюдается, начиная с $f = f_c'' \sim 0,5$ дин, для AgCl — с $f = f_c'' \sim 50$ дин; в опытах с NaCl при $f = 50$ дин еще сохраняется значительная доля адгезионных контактов. Таким образом, увеличение усилия поджима кристалликов внутри достаточно узкого интервала $\{f_c', f_c''\}$ приводит к качественному изменению возникающих между ними контактов: «слабые» адгезионные контакты, обусловленные, в основном, ван-дер-ваальсовыми дальнедействующими силами, превращаются в «прочные» фазовые, сцепление в которых осуществляется за счет близкодействующих сил, которыми ионы или молекулы связаны в кристаллической решетке.

Проведенная по Герцу для AgCl оценка линейного размера контактной поверхности, соответствующего возникновению фазовых контактов (при $f_c' \leq f < f_c''$), приводит к величине ~ 1000 А, что уже приближается по порядку величины к линейным параметрам дислокационной структуры реальных кристаллов⁽⁶⁾. Таким образом, для зарождения сдвига и образования фазового контакта необходимо создать критическое напряжение в объеме с линейным размером порядка размера данной неоднородности. (Зарождение сдвига в меньшем идеальном объеме кристалла требует более высоких напряжений.) Разумеется, для более точной оценки площади упругого контакта, соответствующего появлению пластических деформаций с образованием фазовых контактов, необходимы точные количественные данные о микрорельефе поверхности кристалла, о соотношении нормальных и сдвиговых компонент контактного напряжения, максимального значения сдвиговой компоненты и критического скалывающего напряжения идеального кристалла.

Мы оценили, таким образом, линейный размер контактной поверхности при упругом соприкосновении, соответствующий появлению фазовых контактов, на основании данных о величине приложенного усилия поджима. Дадим теперь приближенную оценку площади фазовых контактов s , исходя из величины остаточной силы сцепления кристалликов (прочности контактов между ними). Анализ результатов, представленных на рис. 1, показывает, что прочность фазовых контактов, возникающих при усилии поджима кристаллов, равно критическому ($f \sim f_c'$), для молекулярных кристаллов нафталина составляет $\sim 0,01$ дин, а для ионных кристаллов $\sim 0,1$ дин. Принимая, что для контактов с такой малой прочностью реализуется удельная прочность, близкая к теоретической $P_{id} \sim 0,1E$, где E — модуль упругости, получим для нафталина $s \sim \sim p_1 / (0,1E) = \sim 0,01$ дин/ 10^9 дин·см⁻² = 10^{-11} см², для ионных кристаллов аналогично $s \sim 0,1$ дин/ 10^{10} дин·см⁻² = 10^{-11} см². Оказывается, что в наших опытах величина площади фазовых контактов, возникающих

при $f \sim f_c'$, примерно одинакова: ее линейный размер составляет несколько сот А. Вероятно, такая или близкая к ней по величине площадь представляет некоторую минимальную площадь устойчивого фазового контакта, которая реализуется при первичном элементарном акте пластической деформации в контактной зоне при поджиге кристалликов, что предопределяется дислокационной (вообще дефектной) структурой кристаллов.

В соответствии с нашими представлениями о механизме формирования фазового контакта при поджиге кристалликов (пластическое деформирование в контактной зоне) прочностные характеристики контактов определяются в значительной степени механическими свойствами микроскопических объемов в приповерхностных слоях: большой разброс механических характеристик микроскопических объемов ⁽⁷⁾ в конечном счете обуславливает значительную дисперсию прочностных характеристик индивидуальных контактов между отдельными кристалликами при их поджиге.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Поступило
13 V 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Б. В. Дерягин, А. Д. Зимон, Колл. журн., 23, 544 (1961); А. Д. Зимон, Адгезия пыли и порошков, 1967. ² Г. И. Фукс, В. М. Клычников, Е. В. Цыганова, ДАН, 65, 307 (1949). ³ Е. Д. Щукин, Кинетика и катализ, 6, 641 (1965); Е. Д. Щукин, Е. А. Амелина и др., ДАН, 191, 1037 (1970). ⁴ Е. Д. Щукин, Р. К. Юсупов и др., Колл. журн., 31, 913 (1969). ⁵ Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Теория упругости, «Наука», 1965. ⁶ Ван Бюрен, Дефекты в кристаллах, ИЛ, 1962. ⁷ N. Gane, F. Bowden, J. Appl. Phys., 39, 1432 (1968).