

УДК 537.84

*И. Абу-Алджараеш, С. Махмуд, Н. А. Юсуф, Дж. Попплевелл,
М. Эл-Хило*

СУПЕРПАРАМАГНИТНОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ ДИСПЕРГИРОВАНИЕМ ЧАСТИЦ КОБАЛЬТА В РТУТИ*

Магнитные жидкости, образованные диспергированием частиц железа или кобальта в ртути, исследованы в [1...3]; особое внимание уделялось определению повышения устойчивости этих систем в магнитных полях. В настоящей работе суперпарамагнитное поведение, характеризующееся отсутствием остаточной намагниченности и коэрцитивной силы на кривых намагничивания, обсуждается с точки зрения взаимодействия частиц. Следует отметить, что содержание металлических частиц в жидкометаллических системах ограничено несколькими объемными процентами железа или кобальта. Нет эффективных поверхностно-активных веществ, добавлением которых можно было бы создавать силы отталкивания для нейтрализации сил Ван-дер-Ваальса. Следовательно, агрегация под действием близкодействующих и далекодействующих сил существенна даже в отсутствие магнитного поля. Немагнитные покрытия частиц, получаемые добавлением олова в магнитную жидкость, могут, однако, эффективно снижать магнитостатические взаимодействия, препятствуя контакту магнитных сердцевин. Покрытия подавляют также рост частиц, вследствие чего повышают устойчивость жидкости.

Магнитные жидкости, представляющие собой частицы кобальта, диспергированные в ртути, были приготовлены электролитическим путем с использованием сосуда с платиновым анодом и ртутным катодом (ртуть подвергалась перемешиванию). Электролитом являлся хлорид кобальта. Осаждение при плотности тока 25 мА/см² проводилось вплоть до превращения ртути в тиксотропную суспензию с объемной долей кобальта, равной нескольким процентам. В некоторых случаях в конечный продукт добавлялось олово сверх количества, требуемого для образования немагнитного монослойного покрытия на частицах. Измерения намагниченности жидких образцов в полях до 20 кЭ при 300 К проводились на вибрационном магнитометре фирмы «Оксфорд Инструментс».

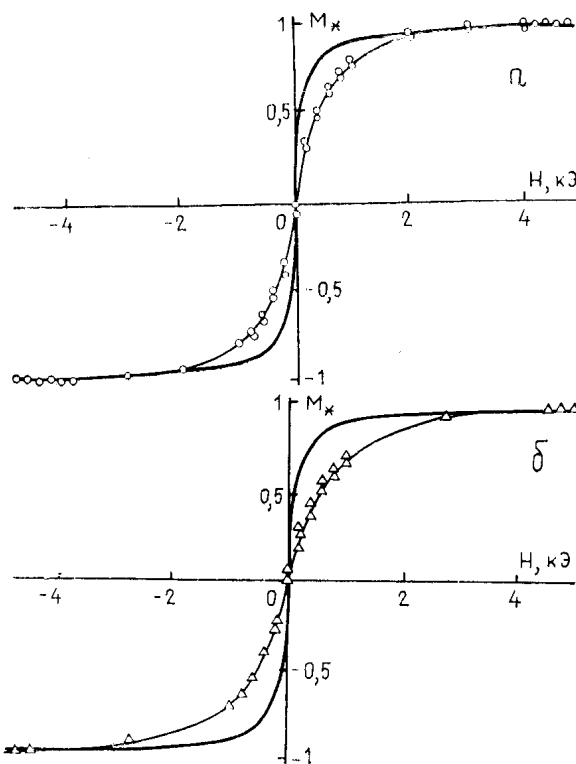
На рис. а представлена кривая намагниченности магнитной жидкости при объемном содержании частиц кобальта (без покрытия) в ртути, равном 0,3%. Суперпарамагнитное поведение очевидно, что характерно для образцов с объемной концентрацией кобальта ниже 1%. Анализ кривых рис. а по методике, изложенной в [4], показал, что экспериментальные значения зависимости $M_*(H)$ существенно ниже теоретических значений для системы невзаимодействующих частиц. Теоретическая кривая на рис. а получена при предположении, что магнитная жидкость обладает логнормальным распределением невзаимодействующих частиц кобальта средним диаметром 10 нм и приведенным

* Superparamagnetic behavior in magnetic fluids containing cobalt particles dispersed in mercury / J. Abu-Aljarayesh, S. Mahmood, N. A. Yusuf (Yarmouk University, Irbid, Jordan), J. Popplewell, M. El-Hilo (University College of North Wales, Bangor, Gwynedd, UK).

Перевод с английского Р. Я. Озолса под редакцией Ю. А. Бирзвалка.

Доклад, представленный на 5-ю Международную конференцию (Рига, сентябрь 1989 г.).

Зависимости $M_*(H)$ ($M_* = M/M_s$) при 300 К для магнитной жидкости на основе ртути, частиц кобальта без покрытия, 0,3% (а) и покрытых оловом, 0,9% (б). Жирной линией показана наиболее близкая к экспериментальным результатам теоретическая зависимость [4] для системы невзаимодействующих частиц.



стандартным отклонением $\sigma=0,4$. Средний диаметр 10 нм соответствует магнитному насыщению при значении поля примерно 3 кЭ, что и наблюдается экспериментально. При меньшем среднем диаметре насыщение наступило бы при существенно более сильных полях, а при большем среднем диаметре — в более слабых. Определение размеров частиц в металлических системах всегда являлось проблемой, поскольку методы сепарации частиц от носителя ненадежны и результаты измерения, следовательно, неубедительны. Метод определения размеров частиц в металлических системах, использованный в настоящей работе, может оказаться более надежным.

В [5] получена теоретическая кривая намагниченности для системы сильно взаимодействующих частиц кобальта диаметром 15 нм с использованием двухмерной модели Монте-Карло. Эта кривая во многом похожа на кривую намагниченности рис. а, для которой значения намагниченности существенно ниже значений для эквивалентной невзаимодействующей системы. Экспериментальная кривая намагниченности на рис. а типична для системы сильно взаимодействующих частиц.

Кривая намагниченности магнитной жидкости с частицами кобальта, покрытыми оловом, представлена на рис. б. Она подобна кривой для частиц без покрытия (см. рис. а), но относится к образцу с большим объемным содержанием кобальта (0,9%). Как можно было ожидать, взаимодействие частиц здесь больше, это выражается в росте отклонения невзаимодействующих частиц от кривой. Влияние покрытия оловом видно из сравнения кривой намагничивания магнитной жидкости при 0,3% частиц кобальта без покрытия с показанной на рис. б. Магнитная жидкость, содержащая частицы без покрытия, находится в состоянии высоковязкой суспензии и обладает как остаточной намагниченностью, так и коэрцитивной силой. Частицы с покрытием, однако, суперпарамагнитны, и вязкость такой магнитной жидкости намного ниже. Следовательно, покрытие оловом способно подавлять не только диффузионный рост [6], но и дальнедействующее структурное агрегирование, характерное для магнитных жидкостей на основе ртути с частицами без покрытия. Покрытие оловом снижает магнитные силы из-за увеличения расстояния между магнитными ядрами.

Дальнейший анализ влияния покрытия частиц оловом на рост и взаимодействие частиц может быть проведен путем сравнения областей высоких значений поля на кривых, представленных на рисунке. Видно, что приближение к насыщению для образцов, содержащих частицы,

покрытые оловом, происходит в более широком интервале поля, чем для образца, содержащего частицы без покрытия. Это позволяет предположить, что кривая распределения частиц с покрытием по размерам сдвинута в области более мелких частиц. Следовательно, рост частиц заторможен; следует также ожидать уменьшение взаимодействия частиц.

Приближение намагниченности к насыщению в сильных полях согласно [7] описывается уравнением

$$M_* = \bar{M}/\bar{M}_s = 1 - 3kT/(4\pi M_s r^3 H), \quad (1)$$

где \bar{M} , \bar{M}_s — соответствующие намагниченности магнитной жидкости; M_s — частицы; r — радиус частицы; остальные обозначения общепринятые. Для логнормального распределения частиц по размерам согласно [4] имеем

$$\bar{M}/\bar{M}_s = 1 - 3kT / \left[4\pi \bar{M}_s r^3 H \int_0^\infty y^{-3} f(y) dy \right], \quad (2)$$

где $f(y)$ — логнормальное распределение при приведенном диаметре $y = D/D_v$ (D_v — средний диаметр); для логнормального распределения (σ — стандартное отклонение)

$$\int_0^\infty y^{-3} f(y) dy = \exp(9\sigma^2/2),$$

и уравнения (1) и (2) совпадают при $\sigma = 0$.

При сильных полях уравнение (2) может быть использовано для оценки влияния покрытия оловом на определение размера частиц. Например, для $M_* = 0,9$ в поле $H = 2$ кЭ (частицы без покрытия) и в поле $H = 2,75$ кЭ (частицы с покрытием) уравнение (2) свидетельствует о том, что покрытие оловом может привести к снижению объема малых частиц на 25% (или к уменьшению радиуса частиц на 10%). Приближение к насыщению, следовательно, является достаточно хорошим показателем доли малых частиц в распределении и пригодно для оценки влияния покрытия оловом на распределение частиц по размерам и на степень их взаимодействия.

В заключение следует подчеркнуть, что количественный анализ кривой намагниченности с учетом взаимодействия частиц пока невозможен. Этот вывод общего характера справедлив особенно в случаях магнитных жидкостей на жидкометаллической основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Windle P. L., Popplewell J., Charles S. W. The longterm stability of mercury-based ferromagnetic liquid // IEEE Trans. Magn. — 1975. — Vol. 11, N 5. — P. 1367... 1369.
2. Popplewell J., Charles S. W., Hoon S. R. Aggregate formation in metallic ferromagnetic liquids // IEEE Trans. Magn. — 1980. — Vol. 16, N 2. — P. 191... 196.
3. Keeling L., Charles S. W., Popplewell J. The prevention of diffusional growth of cobalt particles in mercury // J. Phys. — 1984. — Vol. F14, N 12. — P. 3093... 3100.
4. Chantrell R. W., Popplewell J., Charles S. W. Measurements of particle size distribution parameters in ferrofluids // IEEE Trans. Magn. — 1978. — Vol. 14, N 5. — P. 975... 977.
5. Chantrell R. W., Bradbury A., Popplewell J., Charles S. W. Particle cluster configuration in magnetic fluids // J. Phys. Appl. Phys. — 1980. — Vol. 13, N 7. — P. L119... L122.
6. Greenwood G. W. Growth of dispersed precipitates in solutions // Acta Met. — 1956. — Vol. 4, N 3. — P. 243... 248.
7. Bean C. P., Jacobs J. S. Magnetic granulometry and superparamagnetism // J. Appl. Phys. — 1956. — Vol. 27, N 12. — P. 1448... 1452.