

03;05;12

Образование газовых складок в процессе прессования порошка $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

© С.А. Чурин

Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород

Поступила в Редакцию 16 июля 1998 г.

В окончательной редакции 15 января 1999 г.

Приведены условия возникновения разрывов плотности в процессе прессования порошка $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$. Результаты экспериментов объясняются с привлечением теории катастроф. Предполагается, что разрывы плотности являются газовыми складками, возникшими в процессе прессования.

Одной из задач, стоящих на пути использования явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), является изготовление изделий заданных размеров и высокой плотности из ВТСП порошка. Такие изделия, изготовляемые прессованием, представляют самостоятельный научный и технический интерес, а также являются исходными для загрузок, из которых в дальнейшем получают ВТСП длинномерные кристаллы методами Бриджмена–Стокбаргера [1,3] или зонной плавки [2]. Кристаллы, полученные таким образом, обладают существенно большей плотностью критического тока, чем исходные загрузки. В работе [4] было показано, что наличие пор в загрузке ведет к нарушению стехиометрии кристалла в процессе кристаллизации, изменению параметров кристалла по его длине. Нарушения стехиометрии тем выше, чем больше концентрация пор и их размер. Поэтому получение высокоплотных, длинномерных загрузок $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ становится актуальной задачей. Однако получение загрузок прессованием сопровождается образованием в них различного рода дефектов. Одним из таких дефектов являются разрывы плотности.

Явление стратификации порошков ранее было описано в [5] в рамках континуальной модели псевдооживления многокомпонентных сред. И объяснялось наличием трения между порошковой средой и стенками трубы, приводящего к неоднозначности распределения скорости потока порошковой среды по длине трубы. Покажем, что возникающие в про-

цессе статического прессования разрывы плотности, возможно, также являются газовой складкой: часть газа, заполняющего поры засыпки, в процессе прессования собирается в одной плоскости. Ниже приводятся результаты экспериментов по прессованию порошка $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ и расчетов на основе теории катастроф [6,7], позволяющие определить координаты образования складок.

В настоящей работе порошок (характерный размер отдельных частинок $10 \mu m$) насыпали в цилиндрические пресс-формы диаметром 15 или 50 mm и уплотняли с помощью пресса. Плотность засыпки не превышала $2.5 g \cdot cm^{-3}$. После прессования давлением $5 \cdot 10^4 N \cdot cm^{-2}$ плотность загрузки увеличивалась до $3.5 g \cdot cm^{-3}$. Скорость движения поршня в процессе прессования составляла $\sim 1 mm \cdot s^{-1}$. После выпрессовывания из формы диаметром 15 mm полученного изделия длиной $\sim 50 mm$ оно в ряде случаев (давление более $1 \cdot 10^4 N \cdot cm^{-2}$) разваливалось на 2–3 фрагмента длиной 1.5–2 cm. Разрыв плотности шел по поверхности второго порядка. Поверхность разрыва не имела характерных для слома ступенек. Выпуклостью поверхность разрыва обращена к поршню пресса. Нормаль к поверхности разрыва на оси симметрии совпадала с осью пресс-формы. В случае диаметра загрузки 50 mm длина фрагментов составляла несколько mm при толщине засыпанной массы 7–8 mm. Поверхность разрыва в этом случае своей выпуклостью была обращена от поверхности поршня. По обе стороны от поверхности разрыва плотность изделий менялась непрерывно. С целью выполнения численных оценок определения координат складок на основе теории катастроф [6,7] необходимо найти распределение скорости движения газа по длине засыпки в процессе прессования. Рассмотрим более подробно процесс прессования. Для простоты остановимся на одномерном движении порошка в полубесконечной среде. Под действием поршня пресса начинается движение порошка и газа, заполняющего поры. Меняется пористость засыпки и давление газа в ней. Конечно, объем засыпки соединен с атмосферой и часть газа под действием давления выходит из засыпки. Но скорость выхода газа находится в сильной зависимости от пористости среды, расстояния, проходимого газом до границы засыпки [8], и в нашем случае была много меньше скорости движения поршня. Поэтому в процессе прессования всегда будет перепад давления газа по длине засыпки. Под действием этого перепада давления начинается движение газа по порам засыпки со средней скоростью на выходе отрезка толщиной $\Delta \xi$, определяемой

законом Дарси [8]:

$$\langle v \rangle = \eta^{-1} K (\Pi \nabla \langle p \rangle + \langle p \rangle \nabla \Pi), \quad (1)$$

где η — вязкость газовой среды, $K = \Pi^3 \times d^2 \times (1 - \Pi)^{-2}$, d — характерный размер поры, Π — пористость среды, $\nabla \Pi$ — градиент пористости среды, $\langle p \rangle$ — среднее значение давления газа в среде, $\nabla \langle p \rangle$ — градиент среднего значения давления газа в среде на отрезке $\Delta \xi$. В выражении (1) мы пренебрегли силой тяжести. С целью упрощения дальнейших оценок примем, что пористость засыпки — величина постоянная, а давление является функцией длины засыпки и не меняется во времени. В этом случае средняя скорость движения газа [8]:

$$\langle v \rangle \approx -\eta^{-1} K \Pi \nabla \langle p \rangle. \quad (3)$$

Для того чтобы найти среднее значение давления газа в порошке — $\langle p \rangle$, положим, что распределение давления по длине засыпки определяется выражением [9]:

$$p(\xi) = p_0 \left(1 - \exp \left(-\frac{R^2}{2\nu \xi^2} \right) \right), \quad (4)$$

где p_0 — давление на поверхности поршня; R — радиус цилиндрической засыпки; ν — коэффициент, определяющий передачу вертикальной нагрузки на боковую стенку пресс-формы. Выражение (4) найдено и экспериментально проверено для грунта. И применение его для настоящего случая может быть оправдано тем, что грунт, так же как и ВТСП порошок, является окислом с малой пластичностью. Поэтому следует ожидать их одинакового поведения в процессе прессования. Давление в газовой среде, заполняющей поры засыпки, будет, конечно, меньше давления в порошковой среде, но будем считать, что его распределение по длине пресс-формы так же описывается законом (4) с точностью до постоянного множителя. Положим также, что среднее значение давления на отрезке ξ_i, ξ_j будет равно значению давления на середине выбранного отрезка: $\langle p \rangle \approx p(\langle \xi \rangle)$. В этом случае для среднего значения скорости в точке $\xi = 0.5(\xi_i + \xi_j)$ будем иметь следующее

выражение:

$$v(\xi) \approx \langle v \rangle \approx \eta^{-1} K \Pi p_0 \exp\left(-\frac{4a^2}{\xi^2}\right) \frac{8a^2}{\xi^3}, \quad (5)$$

где $a^2 = R^2/2\nu$. Поскольку точки ξ_i, ξ_j выбраны были нами произвольно, можно считать, что выражение для скорости движения газа (5) справедливо для всей толщины засыпки. Далее воспользуемся стандартным подходом для определения координаты образования складки [6,7]. Положим, что на отрезке ξ_i, ξ_j частицы газа движутся с постоянной скоростью (5). Координата начала образования газовой складки может быть определена из уравнения [6,7]:

$$x_s = \xi + v(\xi)(t - t_0), \quad (6)$$

где ξ — лагранжева координата газового потока; t — время движения; $v(\xi)$ — скорость движения газа в порошковой среде, которая определяется (5). Определяя $d\langle v \rangle/d\xi$ и приравнявая ее 0, находим, что при $\xi > (8/3)^{0.5}a$ производная становится отрицательной, а при $\xi < (8/3)^{0.5}a$ она положительна, т.е. в этом случае возможно наблюдение движения газа к поршню. Далее, находя вторую производную (5) по ξ и приравнявая ее 0, определяем два корня получившегося алгебраического уравнения: $\xi_1 = (3.5)^{0.5}a$ и $\xi_2 = (1.5)^{0.5}a$. Напомним, что ξ_1 и ξ_2 — лагранжевы координаты, с которых начинается образование складки. Далее не представляет труда определить координату образования складки:

$$x_{кр} = \xi_{кр} - \frac{v(\xi_{кр})}{v'(\xi_{кр})}, \quad (7)$$

где $\xi_{кр}$ принимает значение ξ_1 или ξ_2 . Выполняя необходимые вычисления, находим два значения для начала образования складки: $x_{кр1} \approx 4.48a$ и $x_{кр2} \approx 0.54a$. Можно предположить, что $x_{кр1}$ отвечает за образование складки при малых диаметрах формы. Обратная складка при малых диаметрах пресс-формы сформироваться не успевает — значительная часть газа, заполняющего поры, выходит из засыпки по границе порошка с формой. В случае большего диаметра пресс-формы обратная складка сформироваться не успевает и ей отвечает координата $x_{кр2}$. Разрыв плотности по поверхности второго порядка также обусловлен выходом газа из засыпки. С учетом границ пресс-формы распределение

давления газа (4) является функцией текущего радиуса пресс-формы. Приведенные выше выражения для ξ_1 и ξ_2 допускают численную проверку результатов экспериментов. Положим, что радиус пресс-формы равен 0.75 см и ν равна 1. Здесь необходимо отметить, что ν не превышает 1. В этом случае $a \approx 0.5$ см и $x_{кр1} \approx 2.2$ см, что находится в удовлетворительном согласии с результатами экспериментов. Выполняя аналогичные расчеты для пресс-формы большего диаметра — 50 мм, находим, что координата образования обратной складки $x_{кр2} \approx 9$ мм. Эта величина заметно отличается от наблюдаемой в эксперименте, что связано с грубостью расчетной модели и, возможно, с тем, что функция распределения давления (4) вблизи поверхности поршня в нашем случае заметно отличается от предложенной в работе [9]. При достаточной длине засыпки возможно формирование нескольких складок, следующих друг за другом приблизительно через равные промежутки. Образование складок удается предотвратить откачкой газа из пористой среды до давления не более 10 Па до начала прессования. Разумеется, что образование складок наблюдается в процессе прессования и других материалов, например Y_2O_3 .

Работа выполнена в рамках проекта 95032 направления "Сверхпроводимость" программы "Актуальные проблемы в физике конденсированных сред".

Список литературы

- [1] *Jin S., Tefel T.H., Sherwood R.S et al.* // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 52. P. 2074–2076.
- [2] *Salama K., Lee D.F.* // Supercond. Sci. Technol. 1994. V. 7. P. 177–93.
- [3] *McGinn P.J., Black M.A. et al.* // Phys. C. 1988. V. 156. N 24. P. 57–61.
- [4] *Чурин С.А.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 8. С. 85–89.
- [5] *Галин Л.А., Гупало Ю.П., Черепанов Г.П.* Механика многокомпонентных сред в технологических процессах. М.: Наука, 1978. 147 с.
- [6] *Арнольд В.И.* Теория катастроф. М.: Наука, 1990. 128 с.
- [7] *Зельдович Я.Б., Мишкис А.Д.* Элементы математической физики. М.: Наука, 1973. 352 с.
- [8] *Лыков А.В.* Теплообмен. М.: Энергия, 1978. 477 с.
- [9] *Кандауров И.И.* Механика зернистых сред и ее применение в строительстве. Л.: Стройиздат, 1988. 281 с.