

5. Luca D., Bulea M. A versatile computer – controlled data acquisition system for measurements on ferromagnetic materials. *Revue Roumaine de Physique*, Tome 37, nr.1, 1992, p. 75–81.
6. Severdenko, V.P., Klubovici, V.V. *Prokatka i volocenie ultrazvukom*, Nauka i Tehnika, Minsk, 1970.

Поступила 14.03.02

Summary

The paper shows some modification of the magnetic characteristics obtained at the wires made from RULIV STAS 1250/SH 15 GOST 801 by drawing in supersounds field with superacoustic systems dimensioned in “ $n \cdot \lambda/2$ ”, with the drawing direction by rapport with the classical processing. In this way it is been put into evidence the reduction of tensile state for the wires drawn in supersounds field produced by the “surface effect” of supersounds, obtained on the basis of “the friction reversal mechanism”.

С.А. Баранов

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ И ТЕРМОПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, УЧАСТВУЮЩИХ В ФОРМИРОВАНИИ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРЫ МИКРОПРОВОДА

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, МД-2028, Республика Молдова*

Введение

Основным условием получения литого микропровода методом Улитовского-Тейлора является сцепление капилляра из силикатного стекла с металлической жилой [1]. Существование разности потенциалов между расплавленной металлической каплей и стеклянным тиглем, в который она помещена, предполагает существование электрохимических процессов в активной области формирования микропровода, где происходит окисление металла и создание поверхности оксидного слоя. Эти явления давно известны в электрохимии и относятся к электрокапиллярным эффектам. Уточняющие опыты с включением в цепь расплавленный металл – расплавленное стекло дополнительного внешнего источника постоянного напряжения позволило оценить величину разности потенциалов, которая по порядку величины составляет не более двух вольт.

Данное явление может быть реализовано следующим способом: при соприкосновении расплавленного металла с жидким стеклом на границе происходит химическая (или электрохимическая) реакция, при которой отрицательный ион кислорода (из расплавленного стекла) соединяется с положительным ионом металла. Для интенсификации этих процессов в сплав добавляются поверхностно-активные вещества [2]. С одной стороны получаемая окисная пленка приводит к созданию двойного электрического слоя. Но с другой стороны, именно, данная оксидная пленка и создает сцепление металла со стеклянным капилляром.

Нас интересуют две важные технологические задачи:

1. Создание технического устройства для управления электрохимическим процессом (аспекты этого исследования рассмотрим в другой работе).

2. Изучение влияния "энергии сцепления" металла и стекла на свойства микропровода. Покажем, что энергия электрохимического взаимодействия определяет формирование микропровода. В частности, адгезия металла к стеклу обеспечивает величину и картину распределения остаточных напряжений, которые создают специфическую магнитную структуру. Неучет этого факта привел к неправильным граничным условиям и спорным окончательным выводам. В этом смысле результаты

этой работы отличаются от результатов [3–5], где факт существования поверхностной электрохимической энергии игнорируется.

Электрокапиллярные явления в микропроводе

Описание электрокапиллярности неразрывно связано с представлением о строении двойного электрического слоя. Математическая интерпретация этой идеи может быть основана на использовании уравнений Липпмана: (запишем их в удобной для нас форме)

$$\begin{aligned} -d\sigma_{12} &= qd\varphi \\ \partial^2\sigma_{12}/\partial^2\varphi &= c \end{aligned} \quad (1)$$

где σ_{12} – дополнительная часть межфазного натяжения, связанная с электропотенциалом φ на границе раздела фаз; q – плотность заряда на границе двух фаз; c – удельная поверхностная электроемкость двойного электрического слоя. Решение (1) приводит к следующей формуле для величины удельной электрокапиллярной энергии [6]:

$$\Delta\sigma_{12} \approx A\Delta\varphi^2, \quad (2)$$

где опустим следующие члены разложения по выбранной нами обобщенной термодинамической координате, которая по физическому смыслу является квадратом разности потенциала – $\Delta\varphi^2$. Начало координат (точка, от которой отсчитывается разность потенциалов) соответствует точке нулевого заряда (см. подробнее [6]). Если изучается электрокапиллярная кривая знак константы A – отрицательный, а в нашем случае, когда речь идет об адгезии, A – положительна. Фактически эти кривые являются их зеркальными отражениями.

Как следует из анализа экспериментальных данных [6] порядок изменения энергии $\Delta\sigma_{12} \sim (0,1-1)$ Дж/м². Энергия поверхностного натяжения между металлом и стеклом порядка – (1–2) Дж/м² [2]. Как видно, управляемая внешним электрическим полем, энергия электрохимического взаимодействия может существенно понизить энергию межфазного натяжения между металлом и стеклом.

Формирование напряжений в жиле микропровода

Рассмотрим следующую модель формирования напряжений в микропроводе. Благодаря электрохимическому взаимодействию, наружная поверхность жилы подвержена сильному сцеплению со стеклянной оболочкой. Во внутренней части жилы могут идти еще процессы термопластической релаксации. Рассчитаем остаточные напряжения в рамках простейшей теории [7]. Примем следующую модель: жила микропровода от центра цилиндра до внутреннего радиуса b подвержена сильным термопластическим релаксациям; от b до радиуса жилы $r_{жс}$ “застывает” раньше и в ней существуют только упругие остаточные напряжения. На основании данной модели и используя результаты [8], получим:

А). Если $r > b$, но естественно не больше радиуса жилы – $r_{жс}$.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= P [1 - (b/r)^2] + \sigma_{rp}, \\ \sigma_\varphi &= P [1 + (b/r)^2] + \sigma_{\varphi p}, \end{aligned} \quad (3)$$

параметр P – был задан в [8] и по порядку величины определяется произведением разности коэффициентов термического расширения стекла и металла, на разность температур между началом застывания композита и температурой окончания релаксации (которую можно считать комнатной) и модулем Юнга металла.

Б). Если $r < b$ остаются только пластические напряжения

$$\begin{aligned} \sigma_{rp} &\sim 2K \ln [r/b], \\ \sigma_{\varphi p} &\sim 2K[1 + \ln [r/b]]. \end{aligned} \quad (4)$$

Из физических соображений применимость (4) ограничена снизу $r_{кр}$ (см. подробнее в [7]). Отметим, что в жиле существуют и другие напряжения, обусловленные, например, спецификой термической закалки, но с более слабой аналитической зависимостью σ от r . Параметры K и b предполагается получить из экспериментов по нахождению распределений внутренних напряжений методом ферромагнитного резонанса [9]. Оценка K и b из сравнения теории с экспериментом [9] для аморфного

микропровода с положительной магнитоотрицательностью λ дает: $\lambda K \sim 10$ Дж/м³, а $b \sim 1 - 5$ мкм. Параметр максимальных напряжений, определяемый величиной λP может быть больше на порядок.

Магнитные свойства

Предположим, что намагниченность микропровода с положительной магнитоотрицательностью направлена вдоль оси цилиндра. Перемагничивание осуществляется движением доменной стенки. Зарождение доменной стенки выгодно в области $r < b$, так как там рассчитанная нами анизотропия меньше. Минимизация суммы двух энергий, а именно энергии обменного взаимодействия и деформационной анизотропии по координате r даст следующее значение для толщины доменной стенки

$$\Delta \approx A_1 / (2\lambda K b) \sim 0,5 - 0,1 \text{ мкм}, \quad (5)$$

где величина обменной энергии $A_1 \sim 10^{-2}$ нДж/м. Рассмотрим микропровод с двумя цилиндрическими доменами. Радиус внутреннего домена $r\Delta$ находится из условия равенства объемов доменов, но если $r\Delta > b$ увеличение внутреннего домена (для компенсации магнитной энергии внешнего домена) лимитировано возрастанием энергии анизотропии. Минимизация суммы данных энергий дает оценку:

$$r\Delta^2 \sim (r_{\text{жс}} b)B, \text{ где } B^2 = 3 \lambda P / 2\pi M^2. \quad (6)$$

Обычно для материалов с малой магнитоотрицательностью B будет меньше единицы и микропровод находится в намагниченном состоянии.

Обсуждение результатов и экспериментальные оценки

Сравним характерные энергии системы. Если считать, что толщина переходного слоя спая металла со стеклом d меньше микрона, то для характерных плотностей энергий получим неравенства

$$\Delta\sigma_{12}/d > \lambda P > \lambda K.$$

Таким образом, получается логически согласованная картина в количественном отношении. Можно утверждать, что энергии “спая” металла со стеклом, по крайней мере, достаточна для того, чтобы этот “спай” не был разрушен. С другой стороны, достаточно большая энергия λP должна убывать к центру жилы, благодаря термопластическим процессам. Это приводит к уникальным свойствам микропровода таким, как сохранение остаточной намагниченности микропровода, которое наблюдается экспериментально.

Выводы

1. С помощью изменения электропотенциала в расплавленной капле металл-стекло можно изменять адгезию, что создает предпосылки улучшения спая металла со стеклом.
2. Возникающие напряжения возрастают на поверхности жилы. Поэтому литой аморфный микропровод (в стеклянной оболочке) может обладать остаточной намагниченностью, обусловленной специфическим распределением внутренних напряжений. Данное свойство микропровода может быть использовано для создания долговременных элементов магнитной памяти и в других электронных устройствах.
3. Управление адгезией электрохимическими методами может изменить магнитные свойства аморфного микропровода.

Считаю своим приятным долгом выразить благодарность А.И. Дикусару за ценные дискуссии по вопросам электрокапиллярности и помощь в редактировании статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов С.А Производство и свойства аморфного микропровода // Электронная обработка материалов 1999. № 1. С. 66–71.
2. Баранов С.А Получение литого микропровода с аморфной структурой жилы и изучение спая стекло-аморфный металл // Вестник Приднестровского университета 1999. № 2 (11). С. 15–16.
3. Chiriac H., Ovari T. A., Pop Gh. Internal stress distribution in glass-covered amorphous magnetic wires. // Physical Review B 1995, v. 52, № 14, p.10 104 – 10 113.

4. *Velasquez J., Vazquez M., Zhukov A.P.* Magnetoelastic anisotropy distribution in glass-coated microwires // *J. Mater. Res* 1996 v. 11. № 10, p. 2499–2505.
5. *Antonov A.S., Borisov V.T., Borisov O.V., Prokoshin A.F., Usov N.A.* Residual quenching stresses in glass-coated amorphous ferromagnetic microwires // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2000, v.33 p.1161–1168.
6. *Попель С.И.* Влияние поляризации на межфазное натяжение в системе металл-оксидный расплав и на адгезию фаз // *Поверхностные свойства расплавов*. 1982. С.78–106.
7. *Боли Б., Уэйнер Дж.* Теория температурных напряжений. М., 1964. С. 479–481.
8. *Баранов С.А., Бержанский В.Н., Зотов С.К., Кокоз В.Л., Ларин В.С., Торкунов А.В.* Ферромагнитный резонанс в аморфных магнитных проводах // *ФММ*. 1989. Т.67 . В. 1. С. 73–78.
9. *Баранов С.А.* Оценка распределения остаточных напряжений в жиле аморфного микропровода // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2001. № 3. С. 34–36.

Поступила 22.08.01

Summary

The influence of electrochemical of interaction on formation of a microwire is studied. With the help of change of electro potential in molten metal and glass can change connection metal – glass. The connection maintains of the greater energy of residual pressure. The pressures are decrease to the center of a microwire. The microwire becomes magnetized in a zero field. Magnetic microwire can be used for elements of memory.
