

С.А. Баранов

ОСТАТОЧНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ В АМОРФНОМ МИКРОПРОВОДЕ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-20028, Республика Молдова*

Введение

Литой микропровод (по методу Тейлора-Улитовского) применяется для производства радиопоглощающих материалов, сердечников в трансформаторах, магнитных меток, датчиков в магнитометрах и для других радиотехнических устройств. В металлической жиле, покрытой оболочкой из силикатного стекла, из-за разности коэффициентов термического расширения металла и стекла существуют напряжения, которые влияют на магнитные характеристики (см. подробнее [1–4]). В работе [5] предлагается метод измерения остаточных напряжений, основанный на исследовании ферромагнитного резонанса, позволяющий оценить картину их распределения в жиле аморфного микропровода (измеряя зависимость частоты ферромагнитного резонанса от магнитного поля). Однако он является косвенным, поэтому представляют интерес методы, позволяющие произвести непосредственную оценку остаточных напряжений.

Отметим, что для нахождения напряжений в стеклянной изоляции применяют поляризационный метод Сенармона, который для микропровода использовался, например, в [6, 7]. Поляризационный метод – достаточно сложный, и он измеряет напряжения в стеклянной изоляции, которые сильно неоднородны. В данной работе предлагается метод непосредственного измерения остаточных деформаций в жиле микропровода. Он основан на том, что при стравливании стеклянной изоляции с жилы микропровода будут уменьшаться остаточные напряжения, действующие на данную металлическую жилу, и она должна укорачиваться [8].

Для измерения величины укорачивания микропровод можно растягивать (для измерения его истинной длины до и после стравливания изоляции), пока его сопротивление не начинает расти (благодаря явлению тензочувствительности). Отметим, что измерить истинную длину микропровода возможно и другими способами. Отметим также, что прямое доказательство того, что в жиле литого микропровода существуют именно растягивающие напряжения, на наш взгляд, очень важно, так как в [8] этот факт подвергается сомнениям. Докажем это экспериментально.

Методика исследований

Литой аморфный микропровод был получен на экспериментальной установке производственного объединения “Микрон” со скоростью вытягивания 5 м/с с использованием стеклянной трубки из пирекса. Изготавливались образцы из сплава Fe 5 Co 58 Ni 20 B 16 Si 11 (с достаточно малой магнитострикцией, малой предельной намагниченностью и достаточно большой тензочувствительностью) с радиусом металлической жилы $r_{ж} \sim 5\text{--}15\mu\text{м}$ и толщиной стеклянной оболочки – $h \sim 5\text{--}15\mu\text{м}$.

В основу измерений положен метод горизонтальной нити [9]. Отметим, что метод, описанный в [9], не применялся непосредственно для измерения остаточных деформаций. Его технические подробности изложены в [9]. Поэтому опишем только основные принципы модификации этого метода измерений.

На установке УИМП-3М производились измерения осевого удлинения жилы микропровода. Для этого провод длиной $L \sim 0,2$ м закреплялся (припаивался так, чтобы у концов был омический контакт) горизонтально и растягивался микровинтовым устройством, измеряющим с точностью до 1 $\mu\text{м}$, пока не изменялось его электросопротивление (за счет тензочувствительности). Не снимая провод с установки, при помощи специальной ванночки с раствором плавиковой кислоты стравливалась стеклянная оболочка. После стравливания стекла на жилу микропровода перестают действовать силы, растягивающие ее со стороны стеклянной оболочки, напряжения, и она укорачивается. Опять

производят измерения длины жилы микропровода. Укорачивание жилы превышает 10 μm . Поэтому данная установка позволяет измерять это укорачивание с точностью $\sim 10\%$. Основная погрешность метода может возникнуть из-за того, что нить, закрепленная в крайних точках, по-разному прогибается (в форме цепной линии) за счет уменьшения веса при стравливании стеклянной изоляции. Для учета данного эффекта используем известное решение для нити с распределенным весом (подробнее см., например, в [11]). С достаточной точностью получаем из общей формулы оценку для относительной погрешности:

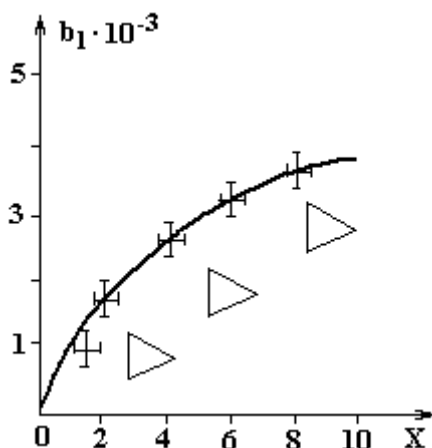
$$(1/b_1) (L \rho_1 g / E)^{1/2} [(1 - X \rho_2 / \rho_1)^{1/2} - 1] \sim 0,1 - 0,2 .$$

Здесь X – отношение площадей поперечного сечения стекла к жиле металла, индекс $i = 1$ относится к металлу, $i = 2$ – к стеклу, b_1 – относительное удлинение микропровода (измеряемое в эксперименте), ρ_i – плотность, g – ускорение свободного падения, E – модуль Юнга металлической жилы.

Данная методика позволяет проводить измерение средних остаточных деформаций в жиле литого микропровода, так как неконтролируемая погрешность (полученная в ходе измерений при статистической обработке результатов) не более 20%. Зная средние деформации, по формулам из работы [1] можно найти средние остаточные напряжения в жиле, которые в данном случае будут растягивающими. Отметим, что можно усовершенствовать измерение удлинений оптическими методами (как это сделано в dilatометре, предложенном в [12]). Отметим также, что тогда погрешность измерения станет меньше погрешностей метода горизонтальной нити. В представленной работе данное усложнение прибора не применялось.

Результаты исследований

Приведем результаты измерений, которые представим в виде графика. На рисунке крестиками представлена зависимость относительного удлинения жилы от X и приведена теоретическая кривая. Треугольниками отмечены деформации жилы, если измерения напряжений в стеклянной изоляции проводить поляризационным методом. Результаты измерений лучше соответствуют теории, потому что напряжения в стеклянной изоляции неоднородны и зависят от режима охлаждения. Напряжения в оболочке силикатного стекла сильнее подвержены релаксационным процессам, чем в жиле микропровода.



Зависимость относительного удлинения жилы от отношения площадей поперечного сечения стекла к жиле металла

Обсуждение результатов

На рисунке представлены экспериментальные данные зависимости относительного удлинения жилы (в единицах, нормированных на длину измеряемого образца) от соотношения площадей поперечного сечения стеклянной оболочки и жилы аморфного микропровода. Для сравнения приведена теоретическая кривая (сплошная линия) относительного удлинения, рассчитанная согласно теории, представленной в работах [1, 2]. На рисунке приведены также рассчитанные (согласно теории в работах [1, 2]) относительные деформации жилы, если измерения напряжений в стеклянной изоляции проводить поляризационным методом Сенармона, который применялся, например, в [6, 7].

Отметим, что результаты, полученные методом непосредственного измерения относительного изменения длины микропровода (после стравливания стеклянной изоляции), лучше соответствуют теоретическим результатам [1, 2], чем аналогичные измерения методом Сенармона. Это может быть

связано с тем, что напряжения в стеклянной изоляции неоднородны и сильно зависят от режима охлаждения, а измеряются усредненные значения данных напряжений. Отметим также, что эти усредненные значения в оболочке из силикатного стекла могут быть больше подвержены релаксационным процессам, чем усредненные значения напряжений в жиле микропровода.

Выводы

1. На основе метода горизонтальной нити [10, 8] разработана методика непосредственного измерения остаточных деформаций аморфного микропровода, которые обусловлены разностью коэффициентов термического расширения для стекла и металла.

2. Экспериментальные результаты находятся в соответствии с теоретическим расчетом (представленным в [1, 2]). Предложенная методика позволяет уточнять феноменологические коэффициенты, входящие в теоретические формулы.

3. В отличие от результата работы [9], где предполагается, что на жилу микропровода действуют сжимающие напряжения, было доказано, что в жиле микропровода имеют место растягивающие остаточные напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов С.А., Бержанский В.Н., Зотов С.К. и др. Ферромагнитный резонанс в аморфных магнитных проводах // ФММ. 1989. Т.67. В. 1. С. 73–78.
2. Баранов С.А., Зотов С.К., Ларин В.С., Торкунов А.В. Особенности естественного ферромагнитного резонанса в аморфном микропроводе // ФММ. 1991. Т.69. В. 12. С. 172–173.
3. Баранов С.А. Исследование микропровода методом ферромагнитного резонанса // Электронная обработка материалов. 1998. №1-2. С. 66.
4. Баранов С.А. Магнитные свойства аморфного микропровода в СВЧ диапазоне // ЖТФ 1998. Т. 68. № 1. С. 136.
5. Баранов С.А. Оценка распределения остаточных напряжений в жиле аморфного микропровода // Металловедение и термическая обработка материалов. 2001. № 4. С. 34–35.
6. Федотова Е.И., Карасева Г.Г., Фармаковский Б.В., Фирсов А.М., Шмуилова Н.П. Исследование свойств стекломатериалов для литья микропроводов в стеклянной изоляции // Электронная техника. 1968. Сер. 9. Вып. 2. С. 12–15.
7. Шмуилова Н.П., Фармаковский Б.В., Федотова Е.И., Фирсов А.М. Напряжения в стеклянной изоляции микропровода в зависимости от выбранных пар стекло–металл и условий термообработки // Микропровод и приборы сопротивлений. Кишинев: Картя молдовеняскэ. 1969. Вып. 6. С. 114–121.
8. Литвак З. В. Измерение остаточных напряжений в жиле микропровода // Микропровод и приборы сопротивлений. Кишинев: Картя молдовеняскэ. 1970. Вып. 7. С. 121–123.
9. Молоканов В.В., Умнов П.П., Куракова Н.В., Свиридова Т.А., Шалыгин А.Н., Ковнеристый Ю.К. Влияние толщины стеклообразного покрытия на структуру и свойства аморфного магнитомягкого кобальтового сплава // Перспективные материалы. 2006. № 2. С. 5–14.
10. Бадинтер Е.Я., Берман Н.Р., Драбенко И.Ф. и др. // Литой микропровод и его свойства. Кишинев: Штиинца, 1973. С. 296–315.
11. Четаев Н.Г. // Теоретическая механика. М.: Наука, 1987. С. 90–92.
12. Чеховский В.Я. // ПТЭ. Измерение напряжения оптическими методами. 1999. № 6. С. 130–132.

Поступила 13.06.06

Summary

The method of measurement of residual deformations in a cast amorphous microwire is developed. Truncation of a corn occurs because of removal of pressure which are caused by a difference of factors of thermal expansion of a metal vein and glass isolation. Measurement of truncation of a corn allows to calculate residual deformations in a corn of a microwire.