

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МИКРОПРОВОДЕ

*\*Институт прикладной физики АН Республики Молдова,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, [dikusar@phys.asm.md](mailto:dikusar@phys.asm.md)*

*\*\*Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко,  
ул. 25 Октября, 128, г. Тирасполь, Республика Молдова*

### Введение

Существует ряд методов экспериментального измерения остаточных напряжений, возникающих в микропроводе в процессе его получения. Ниже будет приведен результат измерения остаточных напряжений с помощью поляриметрического метода, который уже использовался ранее исследователями для других объектов (см., например, [1]). Ранее нами был разработан метод непосредственного измерения деформации жилы [2] (так называемый метод горизонтальной нити), и мы сравнивали результаты этих измерений с полученными методами ферромагнитного резонанса (ФМР) и естественного ферромагнитного резонанса (ЕФМР), которые по величине сдвига или уширения ферромагнитного резонанса позволяют вычислять остаточные напряжения (эти результаты изложены в [3–7]).

### 1. Поляриметрические методы измерения напряжений в микропроводе

Эти методы основаны на законах фотоупругости, а именно на том, что двойное лучепреломление, возникающее в напряженной стеклянной оболочке микропровода, пропорционально действующим в этом теле напряжениям  $\sigma_i$ . Математически закон фотоупругости для наших целей можно записать в следующей форме:

$$\delta = cl\sigma, \quad (1)$$

где  $\delta$  – оптическая линейная скорость хода взаимно перпендикулярных лучей, распространяющихся в напряженном теле;  $c$  – фотоупругая константа, имеющая значения  $(2-3) \cdot 10^{-10} \text{ м}^2 / \text{Н}$ ;  $l$  – толщина стекла  $((1-20) \cdot 10^{-6} \text{ м})$ ;  $\sigma$  – напряжения в стекле.

Угловая разность хода определится:

$$\varphi = 360^\circ \frac{\delta \cdot l}{\lambda}. \quad (2)$$

На практике наиболее простым является метод компенсаций. Суть метода сводится к тому, что поляризованный свет, прошедший через напряженный образец, «компенсируется» стеклянной пластиной, к которой прилагаются напряжения в противоположную сторону. Более точный метод измерения напряжений можно провести по следующей, усовершенствованной оптической схеме. В этом методе эллиптически поляризованный свет преобразуется в линейно поляризованный свет с помощью пластинки с дополнительной разностью хода  $\lambda/4$ .

В стандартном поляриметре ПКС-56 для измерения с компенсатором по предложенной выше оптической схеме используется свет с длиной волны  $\lambda = 340 \text{ нм}$  (в оптическую схему включен зеленый светофильтр). Из экспериментов следует, что напряжения в стекле – это напряжения сжатия (в отличие от напряжений в жиле, которые являются напряжениями растяжения). Метод позволяет получить усредненные по разрешающей способности прибора продольные напряжения. (В рассмотренном случае при измерении брался аморфный провод с толстой жилой, диаметр которого определялся порядка  $(10-15) \text{ мкм}$ .) Сравнить экспериментально найденные остаточные напряжения с теоретическими результатами [3, 6] можно лишь качественно. Ниже в таблице приведены зависимости остаточных напряжений в стеклянной изоляции микропровода от параметра  $x$ , который нахо-

дится как отношение площади поперечного сечения стеклянной оболочки к площади поперечного сечения жилы (данный параметр применяется в теории остаточных напряжений [3, 6]).

*Зависимости остаточных напряжений в стеклянной изоляции (при изменении параметра  $x$ ), измеренные поляриметрическим методом*

$x$	1,5	2	3 и более
$\sigma$ , ГПа	- 0,4	- 0,3	- 0,2
погрешность, %	40	20	30

Знак минус в табличных результатах указывает на то, что остаточные напряжения имеют характер сжимающих напряжений. Отметим, что остаточные напряжения, как это видно из таблицы, убывают по абсолютной величине при возрастании параметра  $x$ , что соответствует теоретическим расчетам, приведенным в [3, 6].

## **2. Заключение**

Экспериментально исследованы остаточные напряжения в стеклянной изоляции в литом аморфном микропроводе. Обнаружено, что остаточные деформации в стекле носят характер сжатия, тогда как деформации в жиле (см. [2–7]) – характер растяжения.

Отметим, что рассмотренные ранее методы измерения остаточных напряжений и представленный здесь метод согласуются с теоретическим расчетом (представленным, например, в [3, 6]) и поэтому подтверждают принятую в [3, 6] модель микропровода.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Рети П. Неразрушающие методы контроля металлов. М.: Машиностроение, 1972. 208 с.
2. Баранов С.А. Остаточная деформация в аморфном микропроводе // Электронная обработка материалов. 2006. № 6. С. 69–71.
3. 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.
4. 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.
5. Баранов С.А. Оценка распределения остаточных напряжений в жиле аморфного микропровода // Металловедение и термическая обработка материалов. 2001. № 4. С. 34–35.
6. Баранов С.А. Остаточные напряжения в жиле аморфного микропровода // Металловедение и термическая обработка материалов. 2003. № 7. С. 38–40.
7. Баранов С.А., Стоянов С.С. Исследование микропровода методом ферромагнитного резонанса // Электронная обработка материалов. 2006. № 3. С. 191–195.

*Поступила 21.11.07  
После переработки 04.02.08*

## **Summary**

The methods of measurement of residual tensing in cast amorphous microwire are submitted. The received experimental results confirm the earlier given theoretical conclusions.