

## МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ МИКРОПРОВОДОВ ПРИ ИХ РАСТЯЖЕНИИ IN SITU

© 2019 г. О. И. Аксенов<sup>а,\*</sup>, Н. Н. Орлова<sup>а</sup>, А. С. Аронин<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Институт физики твердого тела РАН

Россия, 142432, Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, 2

\*e-mail: oleg\_aksenov@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 06.03.2019 г.

После доработки 06.03.2019 г.

Принята к публикации 15.04.2019 г.

Магнитные микропровода являются уникальным материалом с широким спектром магнитных и высокочастотных свойств, имеющих существенный интерес с точки зрения построения на их основе магнитных датчиков. Магнитные свойства микропроводов напрямую зависят от величины и характера распределения напряжений в материале. Поэтому существенный интерес представляет изучение магнитных свойств таких объектов в зависимости от их напряженного состояния. В данной работе описывается метод измерения гистерезисных свойств аморфных микропроводов при их растяжении in situ. Разработана экспериментальная установка, позволяющая проводить измерение зависимостей коэрцитивной силы микропроводов при их растяжении in situ с погрешностью не более 8 А/м при внешнем намагничивающем поле 2000 А/м и частоте 2.5 кГц.

DOI: 10.1134/S0032816219050136

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение аморфных и нанокристаллических микропроводов в стеклянной оболочке представляет существенный фундаментальный и практический интерес. Этот тип материалов обладает широким спектром высокочастотных и магнитных свойств. Естественный ферромагнитный резонанс, бистабильное перемагничивание, малая коэрцитивная сила и другие свойства определяют микропровода как перспективный материал магнитной электроники [1–4].

Сердцевина микропроводов находится в поле упругих напряжений, возникающем в процессе изготовления вследствие закалки и разности коэффициентов термического расширения стекла и металла. Напряжения в совокупности с магнито-стрикцией определяют магнитоупругую анизотропию микропроводов, которая, в свою очередь, вносит существенный вклад в формирование сложной магнитной структуры таких объектов. При этом многие свойства микропроводов определяются именно их магнитной структурой [5–9].

На основании результатов работ [10, 11] принято считать, что магнитная структура микропроводов состоит из доменов сердцевинки (core), магнитный момент которых ориентирован вдоль оси провода, и поверхностных доменов, ориентация магнитного момента в которых зависит от знака

магнито-стрикции:  $\lambda_s < 0$  – циркулярная ориентация;  $\lambda_s > 0$  – радиальная ориентация.

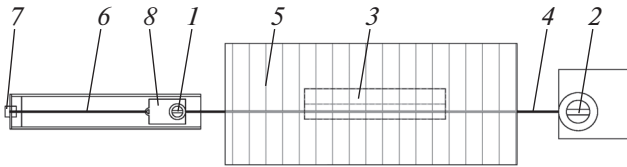
Взаимосвязь напряженного состояния и магнитных гистерезисных характеристик микропроводов является интересным объектом для изучения с точки зрения создания на их основе магнитоупругих датчиков напряжений.

Диаметр микропроводов составляет единицы и десятки микрометров, в связи с чем изучение изменения гистерезисных характеристик при изменении напряженного состояния (растяжение, скручивание, сжатие) таких объектов in situ представляет сложную задачу.

Целью данной работы являлась разработка метода изучения гистерезисных характеристик микропроводов при их растяжении in situ.

### ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения проведены с микропроводом состава  $\text{Fe}_{73.8}\text{Cu}_1\text{Nb}_{2.1}\text{B}_{9.1}\text{Si}_{13}$ , в стеклянной оболочке, с диаметром металлической сердцевинки  $d = 16.5$  мкм и общим диаметром  $D = 23$  мкм. С помощью вибрационного магнитометра модели P.A.R. (Princeton Applied Research) Model 155 Vibrating Sample Magnetometer была проведена оценка коэрцитивной силы исходного микропровода, которая составила 50 А/м. При этом погрешность измерения равнялась 20 А/м.



**Рис. 1.** Схема индукционного магнитометра. 1, 2 – винтовые зажимы для аморфного провода; 3 – измерительная катушка; 4 – микропровод; 5 – перемагничивающая катушка; 6 – нить; 7 – груз; 8 – подвижная каретка для крепления микропровода.

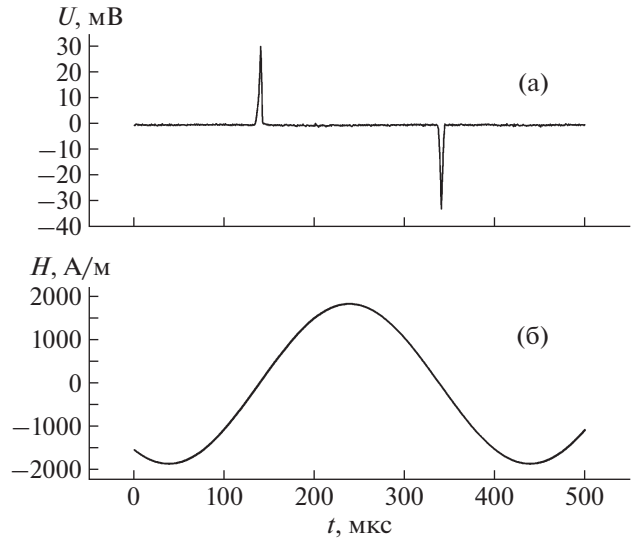
В дальнейшем магнитные свойства микропроводов исследовались с помощью индукционного магнитометра, схема которого приведена на рис. 1.

Микропровод длиной 10 см закреплялся между винтовыми зажимами 1 и 2. Винтовой зажим 2 оставался неподвижным. Зажим 1 располагался на подвижной каретке, соединенной с нитью 6, перекинутой через горизонтальный стержень, расположенный так, что его верхняя точка находилась на уровне плоскости крепления микропровода. К нити, перекинутой через стержень, вертикально подвешивались грузы 7. Каждый последующий груз закреплялся на предыдущем. Измерительная катушка 3, намотанная восьмеркой, располагалась в середине перемагничивающей катушки.

Микропровод натягивался вдоль оси одного из цилиндров измерительной катушки. Такая геометрия эксперимента, с одной стороны, позволяла проводить изучение магнитных параметров, а с другой, – изменять напряженное состояние исследуемого объекта без внесения дополнительных искажений в сигнал.

На перемагничивающую катушку 3 подавался переменный синусоидальный ток частотой 2.5 кГц, создающий внутри катушки перемагничивающее поле напряженностью 2000 А/м. Намотка измерительной катушки восьмеркой эквивалентна встречному включению двух идентичных катушек индуктивности, поэтому при нахождении ее в переменном магнитном поле напряжение, наблюдаемое на концах такой катушки, постоянно и равняется нулю. Таким образом, при нахождении микропровода внутри одного из цилиндров измерительной катушки, на ее концах наблюдается напряжение, возникающее только за счет перемагничивания микропровода. При этом измеряемый сигнал пропорционален производной магнитного потока через исследуемый ферромагнитный образец. Типичный вид измеренного сигнала приведен на рис. 2.

Сигнал напряжения с измерительной катушки регистрировался с помощью 16-битного аналого-цифрового преобразователя, позволявшего добиться точности измерения напряженности поля



**Рис. 2.** Зависимость напряжения на концах измерительной катушки от времени (а) и кривая изменения напряженности магнитного поля от времени (б).

около 8 А/м, что не являлось техническим пределом точности разработанного устройства.

Расчет растягивающих нагрузок, приложенных к аморфной жиле исследуемого провода, оценивался нами с учетом разницы модулей Юнга стекла микропровода и его металлической части. Провод рассматривался в виде системы, состоящей из центральной цилиндрической части и опоясывающего ее цилиндрического слоя стекла. Исходя из литературных данных [9], модули Юнга стеклянной оболочки  $E_{ст}$  и аморфной жилы  $E_{ж}$  принимались нами равными 65 и 154 ГПа соответственно. Третий закон Ньютона для случая осевого растяжения такой системы можно записать в виде:

$$\sigma_{ж} S_{ж} + \sigma_{ст} S_{ст} = mg,$$

где  $\sigma_{ж}$  и  $\sigma_{ст}$  – напряжения в аморфной жиле и стекле,  $S_{ж}$  и  $S_{ст}$  – площади сечения аморфной жилы и стекла,  $m$  – масса груза,  $g$  – ускорение свободного падения. Отсюда получаем, что

$$\sigma_{ж} = mg / [S_{ж} + S_{ст} (E_{ст} / E_{ж})].$$

После измерения сигнала напряжения на измерительной катушке и оценки механических напряжений, приложенных к аморфной жиле, проводилось дискретное интегрирование измеренного сигнала напряжения с измерительной катушки. Эта операция позволяет получить зависимости от напряженности поля магнитной индукции  $B(H)$  и намагниченности  $M(H)$ . На рис. 3 представлены петли гистерезиса, полученные для исходного микропровода и при его растяжении *in situ*.

Из рис. 3 следует, что коэрцитивная сила  $H_C$  провода увеличивалась по мере роста растягива-

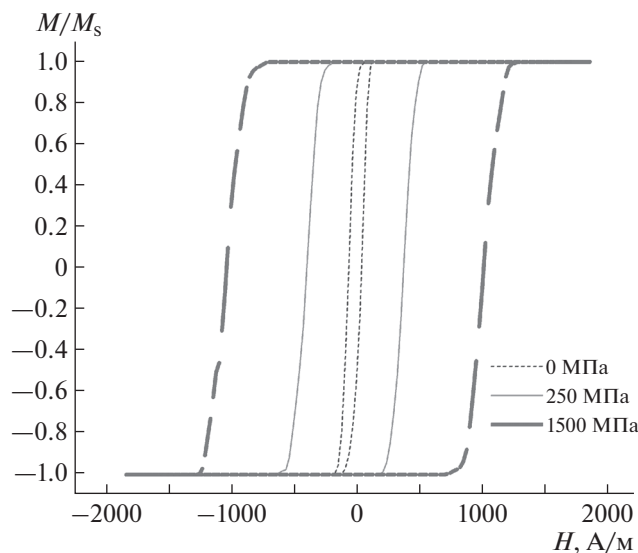


Рис. 3. Петли гистерезиса микропроводов, полученные дискретным интегрированием.

ющих напряжений: 50 А/м – без растяжения (согласуется с результатами вибрационной магнитометрии); 390 А/м – при растяжении 250 МПа и 1000 А/м – при растяжении 1500 МПа. Такая зависимость хорошо коррелирует с известным соотношением для аморфных сплавов [12]:

$$H_C \sim \lambda_s \sigma,$$

где  $\lambda_s$  – магнитострикция насыщения материала,  $\sigma$  – величина напряжений в материале.

Из рис. 3 также видно, что в рамках данной работы не проводилась оценка изменения намагниченности и индукции насыщения материала. Это связано с применением дискретного интегрирования полученного сигнала при обработке, что накладывает более существенные ограничения в отношении точности измерения этих параметров. По нашим оценкам, погрешность измерения намагниченности насыщения  $M_s$  в нашем эксперименте составляет ~17%, что сопоставимо с изменением измеряемой величины при растяжении микропровода. Мы планируем для решения этой задачи применить аппаратное интегрирование.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках госзадания Института физики твердого тела РАН при частичном финансировании Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-32-00251).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vazquez M., Gomez-Polo C., Chen D.-X., Hernando A.* // IEEE Trans. Magnetics. 1994. V. 30. P. 907. <https://doi.org/10.1109/20.312442>
2. *Churyukanova M., Kaloshkin S., Shuvaeva E., Stepashkin A., Zhdnova M., Aronin A., Aksenov O., Arakelov P., Zhukova V., Zhukov A.* // J. Alloys and Compounds. 2018. V. 748. P. 199. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.342>
3. *Zhukova V., Aliev A.M., Varga R., Aronin A., Abrosimova G., Kiselev A., Zhukov A.* // J. Supercond. Nov. Magn. 2013. V. 26. P. 1415.
4. *Aksenov O.I., Abrosimova G.E., Aronin A.S., Orlova N.N., Churyukanova M.N., Zhukova V.A., Zhukov A.P.* // J. Appl. Phys. 2017. V. 122. P. 235103. <https://doi.org/10.1063/1.5008957>
5. *Kabanov Yu., Zhukov A., Zhukova V., Gonzalez J.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 142507. <https://doi.org/10.1063/1.2077854>
6. *Chiriac H., Ovari T.-A., Yamasaki J., Zhukov A.* // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 2001. V. 674. P. U.7.7.1.
7. *Orlova N.N., Aronin A.S., Bozhko S.I., Kabanov Yu.P., Gornakov V.S.* // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. P. 073906. <https://doi.org/10.1063/1.3702448>
8. *Orlova N.N., Gornakov V.S., Aronin A.S.* // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. P. 205108. <https://doi.org/10.1063/1.4984055>
9. *Chiriac H., Ovari T.A., Pop G.* // Phys. Rev. B. 1995. V. 52. P. 10104. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.52.10104>
10. *Varga R., Zhukov A., Blanco J.M., Ipatov M., Zhukova V., Gonzalez J., Vojtanik P.* // Phys. Rev. B. 2006. V. 74. P. 212405. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.212405>
11. *Richter K., Kostyk Y., Varga R.* // Acta Phys. Pol. A. 2008. V. 113. P. 7.
12. *Kittel C.* // Rev. Mod. Phys. 1949. V. 21. P. 541.