

## НАНОРАЗМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ, ВЫРАЩЕННЫЕ В АМОРФНЫХ МИКРОПРОВОДАХ НА ОСНОВЕ КОБАЛЬТА ДЛЯ МАГНИТНЫХ СЕНСОРОВ

Козлов И.В.<sup>1</sup>, Лукьянчук А.А.<sup>2</sup>, Шутов А.С.<sup>2</sup>, Разницын О.А.<sup>2</sup>,  
Гудошников С.А.<sup>1,3</sup>

- <sup>1</sup>) Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия  
<sup>2</sup>) Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва, Россия  
<sup>3</sup>) Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук (ИЗМИРАН), г. Троицк, Россия  
 E-mail: ilya\_mephist@mail.ru

## NANOSTRUCTURES CREATED IN COBALT-BASED AMORPHOUS MICROWIRES FOR MAGNETIC SENSORS

Kozlov I.V.<sup>1</sup>, Lukyanchuk A.A.<sup>2</sup>, Shutov A.S.<sup>2</sup>, Raznitsyn O.A.<sup>2</sup>,  
Gudoshnikov S.A.<sup>1,3</sup>

- <sup>1</sup>) National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, Russia  
<sup>2</sup>) National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia  
<sup>3</sup>) Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia

In this paper, we have focused on determination of the influence prolonged heat treatments of amorphous alloy on the processes of structural relaxation and thermally induced atomic regions formed up to 10 nm in size of the Co-Si-B system.

Объектом исследования являются аморфные ферромагнитные микропровода в стеклянной оболочке с металлической жилой состава  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  и диаметром порядка 30 мкм, изготовленные методом Улитовского – Тейлора. Данные микропровода интересны и с точки зрения общей теории магнетизма, как пример квазиодномерных магнетиков, и для целого ряда технических приложений при изготовлении миниатюрных высокочувствительных датчиков, магнитных меток и смарт материалов.

Магнитные характеристики микропроводов в значительной мере определяются их составом, структурно-фазовыми состояниями и внутренними закалочными напряжениями. При этом магнитомягкие свойства микропроводов могут быть существенно улучшены за счет специальной термообработки. Нами были разработаны методы термической обработки микропроводов с непрерывным мониторингом их электрического сопротивления и микроструктуры при использовании комплекса синхротронных исследований. Для определения в реальном времени структурно-фазовых состояний отрезков микропроводов на синхротронной станции мы использовали автоматизированную систему отжига и

контроля сопротивления образцов [1]. Это позволило обеспечить термообработку образцов микропроводов за счет Джоулева нагрева постоянным током и проводить непрерывное измерение и контроль его электросопротивления, а также структурно-фазового состояния в процессе нагрева. При контролируемой термообработке микропровода постоянным током, в нем были созданы различные наноразмерные структуры – кластеры разных типов и нанокристаллы различных форм и размеров. Наноструктуры были сформированы при длительной термообработке (40 часов) ниже температуры кристаллизации (порядка 400 °С). Указанные структуры детектировались с помощью методов атомно-зондовой томографии и просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Важно подчеркнуть, что кластеры могут образовываться не во всех аморфных сплавах. В нашем случае, они образуются в виде нескольких характерных по размеру фракций. Такая микроструктура отражает максимальную степень релаксации и является началом перехода сплава из вязкого состояния в хрупкое, которое одновременно детектируется и по изменению электросопротивления [2].

На Рисунке 1 приведена карта распределения кластеров и нанокристаллов состоящих из Co, Fe и B в образце-игле из микропровода системы  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ , данные получены с помощью атомно-зондовой томографии. Видно, что образуются кластеры соединений типа CoB и CoSi. Сплав с кластерами характеризуется специфическими магнитными свойствами, обычно это увеличение магнитной проницаемости сплава, стабилизация границ доменов за счет их пиннинга кластерами, уменьшение шумов [3]. В настоящее время проводится характеристика магнитных свойств материала с такой «кластерной» структурой.

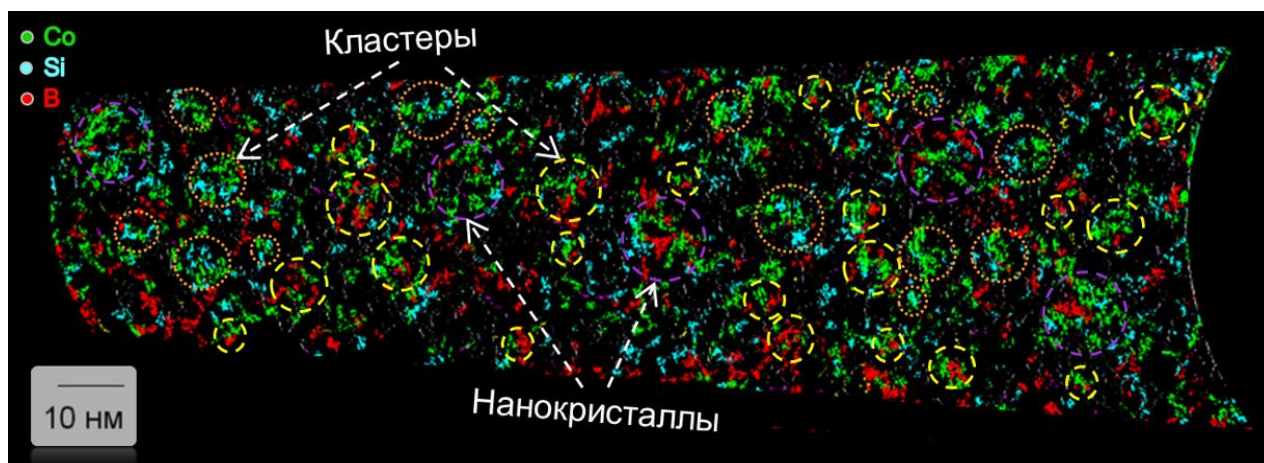


Рис. 1. Карта распределения наноразмерных структур на основе Co, Si, B в микропроводе. Кругами фиолетового цвета выделены нанокристаллы, а желтого и оранжевого цветов – кластеры CoB и CoSi

*Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку Российского научного фонда, грант 20-19-00607.*

1. S.A. Gudoshnikov, V.I. Odintsov, B.Ya. Liubimov, S.A. Menshov, M.N. Churukanova, S.D. Kaloshkin, G.N. Elmanov, *Measurement* 182, 109783 (2021).
2. G.N. Elmanov, I.V.Kozlov, S.M. Irmagambetova, K.E. Prikhodko, R.D. Svetogorov, P.A. Chernavskii, A.A. Lukyanchuk, A.M. Shutov, O.A. Raznitsyn, V.P. Tarasov, S.A. Gudoshnikov, *J. Alloys Compd.* 872, 159710 (2021).
3. I.B. Kekalo, D.Z. Lubyanyi, P.S. Mogil'nikov, I.A. Chichibaba, *Phys. Met. Metallogr.* 116, 645–655 (2015).