

УДК 537.62,537.63

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНЫХ И МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АМОРФНЫХ “ТОЛСТЫХ” МИКРОПРОВОДОВ, ОБОГАЩЕННЫХ КОБАЛЬТОМ

© 2019 г. Е. Е. Шальгина<sup>1</sup>, \*, В. Д. Рубцов<sup>1</sup>, А. Н. Шальгин<sup>1</sup>, В. В. Молоканов<sup>2</sup>,  
Т. Р. Чуева<sup>2</sup>, П. П. Умнов<sup>2</sup>, Н. В. Умнова<sup>2</sup>, Д. А. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии  
и материаловедения имени А.А. Байкова Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: shal@magn.ru

Поступила в редакцию 07.09.2018 г.

После доработки 31.01.2019 г.

Принята к публикации 27.03.2019 г.

Представлены результаты исследования структурных и магнитных характеристик  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  аморфных микропроводов с диаметрами магнитной жилы 35–360 мкм, полученных с помощью модернизированного метода Улитовского–Тейлора. Обнаружено, что микропровода имеют стабильные геометрические размеры вдоль их длины и почти бездефектную поверхность, характеризуются высокой пластичностью и прочностью, их магнитные характеристики зависят от диаметра. Показана возможность практического применения микропроводов.

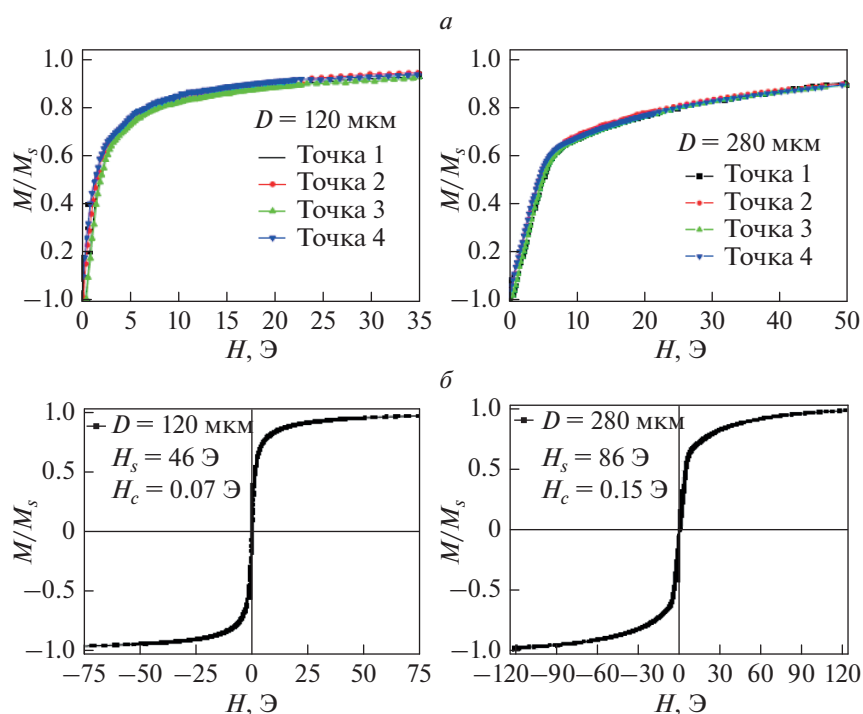
DOI: 10.1134/S0367676519070354

Аморфные магнитные материалы были получены более 60 лет назад. Однако интерес к изучению их структурных, магнитных и кинетических свойств сохраняется до сих пор. Этот факт обусловлен возможностью широкого использования аморфных материалов в современной микро- и наноэлектронике при относительно низкой их стоимости [1–3]. Ранее аморфные микропровода в стеклянной оболочке толщиной до 15 мкм с диаметром магнитной жилы 2–40 мкм в основном получали с помощью капельного метода Улитовского–Тейлора. Процесс получения микропроводов в этом случае был нестационарным. Вследствие этого наблюдалась нестабильность их геометрических параметров и физических характеристик. Модификацией капельного метода изготовления аморфных микропроводов является “непрерывный” метод литья, разработанный в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН [4], позволяющий получать “толстые” аморфные микропровода с диаметром магнитной жилы вплоть до 400 мкм. Исследование физических свойств таких микропроводов заслуживает внимания как с научной, так и практической точки зрения.

Данная работа посвящена исследованию структурных и магнитных характеристик  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  аморфных микропроводов с

диаметрами магнитной жилы 35–360 мкм, полученных с помощью модернизированного метода Улитовского–Тейлора. Технология изготовления микропроводов состояла в следующем. Прекурсор в виде стержня диаметром 3.6 мм был изготовлен из модельного сплава  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  с использованием методики, описанной в [5]. Микропровода с диаметром  $d$  магнитной жилы 35–360 мкм были получены путем изменения скорости вытяжки и расстояния от вершины конуса расплава до поверхности закалочной жидкости. Измерения были выполнены на микропроводах с максимальной способностью к изгибу, для которых характерно наличие аморфной структуры. Стеклянная оболочка микропроводов была удалена.

Рентгеновский анализ изучаемых образцов был выполнен на рентгеновском дифрактометре ДРОН–4–07. Морфология поверхности образцов была изучена с помощью атомного силового микроскопа (АСМ). Приповерхностные локальные кривые намагничивания на участках поверхности размером  $2 \times 0.03 \text{ м}^2$  измерены на магнитооптическом магнетометре [6]. Толщина измеряемого приповерхностного слоя порядка 20 нм. Перемагничивающее поле  $H$  было приложено параллельно длине микропровода. Объемные магнитные характеристики изучаемых микропроводов



**Рис. 1.** *a* – Типичные приповерхностные локальные кривые намагничивания; *б* – объемные петли гистерезиса, наблюдаемые для изучаемых “толстых” аморфных микропроводов.

измерены на вибрационном магнитометре с чувствительностью  $2 \cdot 10^{-7} \text{ G} \cdot \text{см}^3$ . Оценка величины импеданса микропроводов осуществлялась путем использования их в качестве сердечника катушки индуктивности. Измерения проводились на частоте 5 кГц при смещении катушки вдоль длины микропровода.

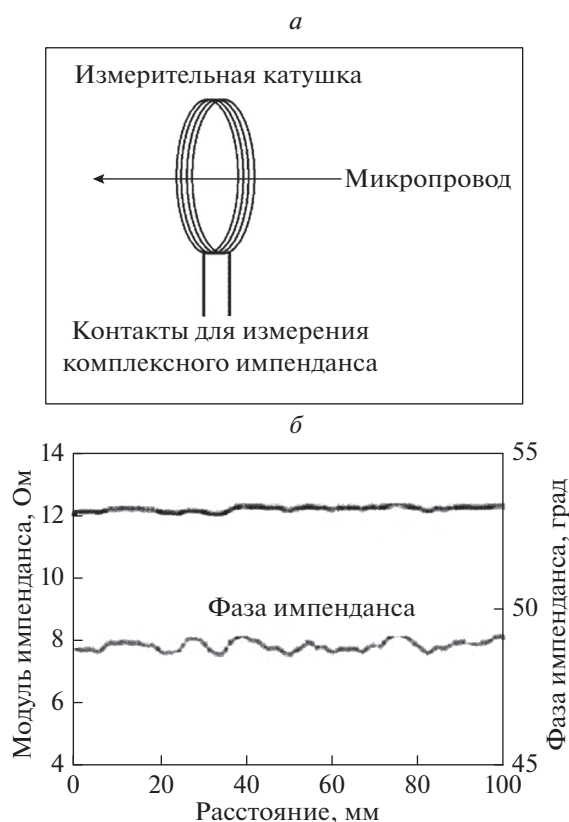
Получены следующие результаты. Среднее значение шероховатости,  $Ra$ , микропроводов не превышает 2–3 нм, что свидетельствует о хорошем качестве их поверхности. Магнитная жила имеет стабильные по длине геометрические параметры, обладает гладкой блестящей зеркальной поверхностью, имеет высокую прочность на растяжение вплоть до 5 ГПа и очень высокую пластичность при изгибе, характеризующуюся способностью провода стягиваться в узел без разрушения.

На рис. 1 представлены типичные приповерхностные локальные кривые намагничивания и объемные петли гистерезиса, наблюдаемые для микропроводов. Анализ полученных данных показал, что различие локальных кривых намагничивания не превышает 5%, что свидетельствовало о высокой однородности локальных магнитных характеристик микропроводов. Коэрцитивная сила  $H_c$  микропроводов не превышает 2 Э. Приповерхностные и объемные значения поля насыщения увеличиваются с ростом диаметра микропровода. Этот экспериментальный факт был объ-

яснен влиянием размагничивающего фактора микропроводов на их магнитные характеристики.

На рис. 2 приведены схема взаимного расположения микропровода и катушки индуктивности и типичная зависимость модуля импеданса от положения катушки индуктивности при ее смещении вдоль длины микропровода  $L$ . Было обнаружено, что изменения модуля импеданса по длине изучаемых микропроводов не превышает 3%, что также подтверждало их высокое качество.

Учитывая вышеописанные свойства  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ -микропроводов, была рассмотрена возможность их практического применения. В частности, они были использованы при изготовлении микророботов для медицинских целей в виде спирали 1 диаметром 200 мкм, длиной 10 мм (MP1) и спирали 2 диаметром 200 мкм, длиной 10 мм с головкой диаметром 330 мкм и длиной 1 мм, созданной наматыванием исходного микропровода на конце спирали в два слоя (MP2). Возможность использования микророботов в эндоваскулярных медицинских вмешательствах была оценена по их способности к передвижению в стеклянной трубке диаметром 2 мм под действием внешнего градиентного магнитного поля, приложенного параллельно длине трубки. Было найдено, что расстояние, на которое перемещается микроробот MP2 под действием магнитного градиентного поля, примерно в 1.7 раза больше, чем микроробота MP1. Этот факт объяс-



**Рис. 2.** Схема взаимного расположения микропровода и измерительной катушки (а) и типичная зависимость модуля импеданса от положения измерительной катушки при смещении ее вдоль длины микропровода (б).

нен наличием магнитной головки, усиливающей взаимодействие микроробота МР2 с внешним магнитным полем.

Была проанализирована также возможность использования  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$  микропроводов для изготовления защитных “подушек”, предохраняющих элементы электронной техники от ударных, вибрационных и тепловых воздействий. Защитные “подушки” были изготовлены в виде микропружин из протяженной аморфной спирали с переменным шагом. Процесс получения пружин

заданных размеров осуществляется в одном процессе. Созданные защитные подушки показали высокий уровень служебных характеристик таких, как сверхупругость, высокая прочность, возможность работать в широком интервале положительных и отрицательных температур, а также широком частотном диапазоне.

Таким образом, исследование “толстых” аморфных  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ -микропроводов, полученных с помощью модернизированного метода Улитовского–Тейлора, показали, что микропровода имеют стабильные геометрические размеры вдоль длины; гладкую, почти бездефектную поверхность; проявляют высокую пластичность и прочность. Изменения модуля импеданса по длине микропровода не превышает 3%. Перечисленные выше свойства микропроводов предопределили их практическое применение. В частности, показано, что  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_4\text{Cr}_4\text{Si}_{12}\text{B}_{11}$ -микропровода в виде спиралей могут быть использованы для создания микророботов, применение которых перспективно при выполнении медицинских вмешательств. Кроме того, они перспективны для изготовления защитных “подушек”, предохраняющих элементы электронной техники от ударных, вибрационных и тепловых воздействий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suzuki K., Fujimori H., Hashimoto K. Amorphous Metals. London: Butterworths, 1983. 328 p.
2. Handrich K., Kobe S. Amorphe Ferro- und Ferrimagnetika. Berlin: Akademie-Verlag, 1980. 293 p.
3. Hasegawa R. // J. Magn. Magn. Mater. 2000. V. 215–216. P. 240.
4. Taylor R. // Phys. Rev. 1924. V. 23. № 5. P. 655.
5. Ulitovski A.V., Maiani I.M., Avramenco A.I. // Patent № 128427 (USSR). Bull. 10. 1960. 14 p.
6. Умнов П.П., Молоканов В.В., Шалимов Ю.С. и др. // Персп. матер. 2010. № 2. С. 87.
7. Умнов П.П., Панферов Д.М., Чуева Т.П. и др. // Персп. матер. 2016. № 7. С. 61.
8. Shalyguina E., Kyung-Ho Shin // ЖЭТФ. 2000. V. 220. P. 167.
9. Nelson B.J., Kaliakatsos I.K., Abbot J.J. // Annu. Rev. Biomed. Eng. 2010. V. 12. P. 55.