

## Магнитные термопары на основе пермаллоев Co–Fe и Ni–Fe

© Т.М. Панахов,<sup>1</sup> А.А. Исаева,<sup>1</sup> Н.М. Рафиев,<sup>1</sup> А.Г. Гусейнов<sup>2,¶</sup>

<sup>1</sup> Азербайджанский университет архитектуры и строительства,  
AZ1073 Баку, Азербайджан

<sup>2</sup> Бакинский государственный университет,  
AZ1148 Баку, Азербайджан

¶ e-mail: aguseinov@bsu.edu.az

Поступило в Редакцию 28 ноября 2018 г.

В окончательной редакции 25 января 2019 г.

Принято к публикации 12 февраля 2019 г.

Полученные на двухвалковой литейной установке сплавы Co–Fe и Ni–Fe в виде гибкой тонкой пленки с аморфной структурой в обычном и намагниченном состояниях являются подходящими материалами для изготовления магнитных термопар. Тонкопленочная форма ветвей термопары в переменном магнитном поле позволяет минимизировать погрешности в измерениях температуры, вызываемые нагревом за счет индукционных токов.

DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47797.410-18

### Введение

Пермаллои, являющиеся сплавами триады железа, обладают широким спектром физико-химических свойств, представляют практический интерес и широко применяются в разных отраслях промышленности [1–3]. Особые магнитные свойства, жаростойкость, высокая коррозионная стойкость, малый коэффициент термического расширения позволяют применять их в условиях высокого уровня радиоактивности, температуры и при наличии контактов с другими материалами. Магнитомягкие сплавы Co–Fe, легированные разными элементами, обладают высоким значением магнитной проницаемости и применяются в виде пленочного материала при изготовлении высокочастотных трансформаторов [4].

Получение пленочных сплавов Co–Fe и Ni–Fe в виде гибкой тонкой пленки с аморфной структурой в обычном и намагниченном состояниях позволяет расширять область их практического применения. В частности, можно изготовить на их основе магнитные термопары, способные контактировать с ферромагнитными телами непосредственно. В настоящей работе приводятся результаты изготовления и исследования термоэлектрических свойств термопары из сплавов Co–Fe и Ni–Fe, имеющие форму узкой тонкой пленки с аморфной структурой.

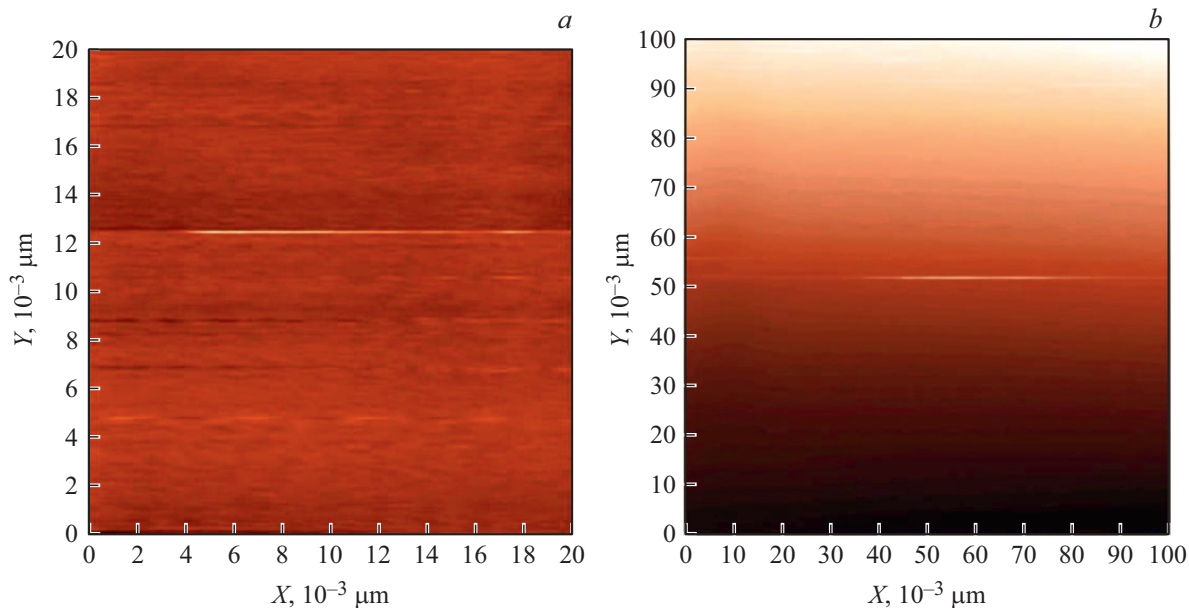
Одним из самых простых сенсоров для измерения и регистрации температуры является термопара. Термопары надежно работают в большинстве сред, выдерживая экстремальные температуры, вибрацию и даже ионизирующее излучение. Термопары в лабораторных условиях и в промышленности часто подвергаются воздействию посторонних, обычно нежелательных и неконтролируемых магнитных полей. При этом параметры сенсоров на основе проволочных металлических пар несколько искажаются под действием магнитного поля. В настоящей работе нами изготовлены термопары из пленочных пермаллоев.

### Изготовление термопары и методика измерений

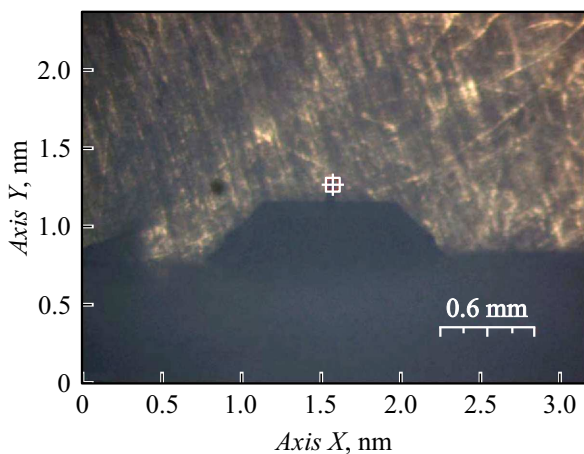
Для получения магнитомягких лент сплавов Co–Fe и Ni–Fe использована двухвалковая литейная установка. Расплавленный в тигле металлический сплав путем донного слива подавался в виде падающей струи расплава в зазор между двумя охлаждающими валками. Валки охлаждались струей потока паров жидкого азота. Процесс охлаждения ленты до температуры 300–400°C происходил в среде смеси азота и инертных газов. Толщина ленты варьировала между 100 и 200 μm, а ширина составила 3 см. На рис. 1 представлено АФМ изображение поверхности ленты Co–Fe (50% — Co и 50% — Fe). Как видно из рисунка, структура ленты однородная и ее поверхность достаточно гладкая. Рентгеноструктурный анализ показал, что ленты обладают аморфной структурой. При отжиге ленты на воздухе при температуре 900°C степень шероховатости намного уменьшается. Как было показано в работе [5], прирост массы происходит за счет окисления пленки. Неравномерность прироста, видимо, связана с незначительной ликвацией Co [6] и наличием небольшого градиента концентрации железа в исследованной области.

Из полученной ленты были вырезаны полоски шириной 1.5 mm и длиной от 20 до 25 см. Концы Ni–Fe полоски были сплавлены и сварены полосками Co–Fe методом электросварки в дистиллированной воде. На рис. 2 показано SEM-изображения полученного контакта двух сплавов. Ровные линии и черты фигуры шестигранника свидетельствует о том, что в процессе образования контакта сплав Co–Fe кристаллизуется.

Один из спаев дифференциальной термопары находился при 0°C, а другой спай в термостате, где была возможность получить температуры от –196 до 500°C. ТермоЭДС измерялась компенсационным методом.



**Рис. 1.** АФМ-изображения поверхности ленты Co–Fe (50% — Co и 50% — Fe): *a* — поверхность свежизготовленной ленты; *b* — после отжига.



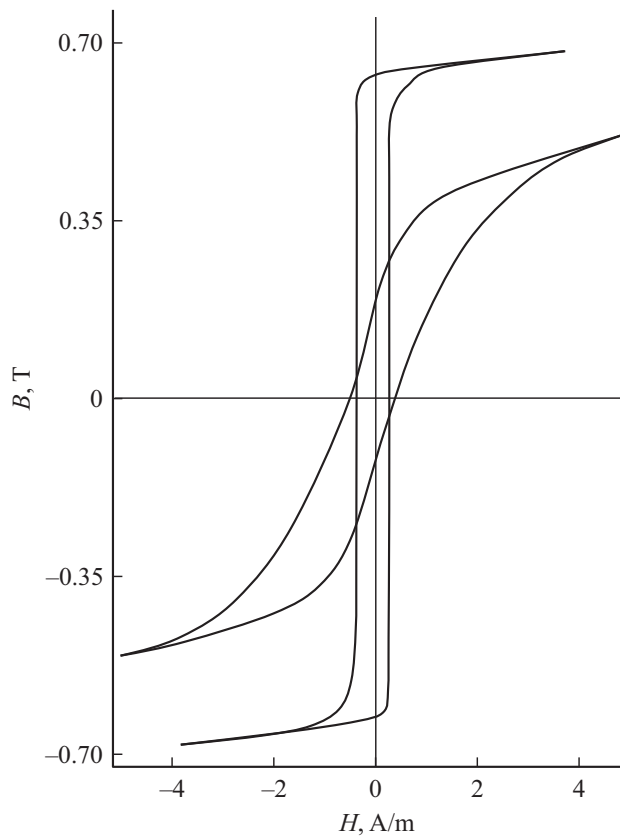
**Рис. 2.** SEM-изображения границы раздела сплавов Co–Fe и Ni–Fe.

### Результаты измерений

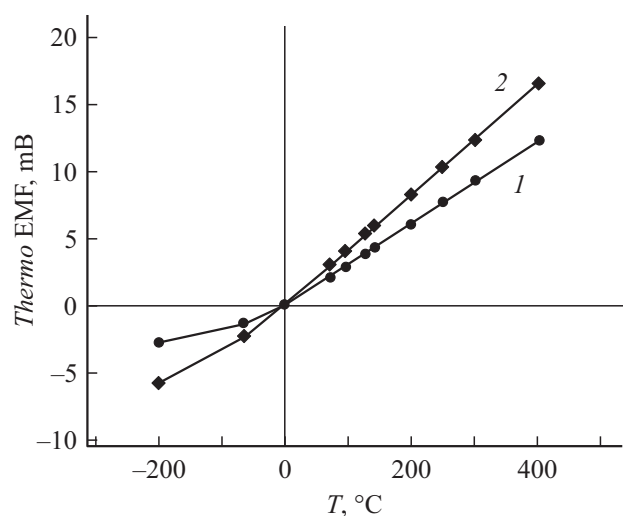
Изготовленные пленочные термопары подвергались намагничиванию в магнитном поле до значений  $H = 4.8 \text{ A/m}$ . На рис. 3. представлены гистерезисные петли ленты пермаллоя Co–Fe (нагретого до  $410^\circ\text{C}$  и закаленного в воде) в переменном и постоянном магнитном поле.

Как видно, из гистерезисной петли, намагниченность ленты достаточна для хорошего прилипания магнитомягкой гибкой термопары из сплавов Co–Fe и Ni–Fe к парамагнитным и ферромагнитным телам. Следует отметить, что пленки сплавов Co–Fe и Ni–Fe обладают высокой коэрцитивностью (20–30 Oe) [7].

Температурная зависимость дифференциальной термоЭДС  $\alpha(T)$  термопары из сплавов Co–Fe и Ni–Fe представлена на рис. 4. В контакте сплавов положи-



**Рис. 3.** Гистерезисная петля ленты пермаллоя Co–Fe, нагретого до  $410^\circ\text{C}$  и закаленного в воде: 1 — в постоянном, 2 — в переменном магнитном поле.



**Рис. 4.** Температурная зависимость дифференциальной термоЭДС термопары пермаллоев (кривая 1) и термопары хромель–алюмель (кривая 2).

тельным потенциалом обладает сплав Co–Fe. По шкале Полинга электроотрицательность железа, кобальта и никеля равны 1.83, 1.88 и 1.91 соответственно. Следовательно, контактная разность потенциалов на границе раздела формируется диффузионным потоком электронов из Co–Fe в Ni–Fe. Ход зависимости  $\alpha(T)$  термопары пермаллоев (ТП) (кривая 1) имеет одинаковый характер с аналогичной характеристикой термопары хромель–алюмель (ТХА — типа К).

Чувствительность термопары пермаллоев немного уступает чувствительности ТХА. Однако термопары пермаллоев обладают рядом преимуществ над ТХА. В частности, намагниченность ТП позволяет примкнуть к исследуемому парамагнитному или ферромагнитному объекту непосредственно за счет магнитного взаимодействия.

При воздействии переменного электромагнитного поля на проводник возникают вихри, вызывающие нагрев [3]. В случае измерения температуры проволоочной термопарой ТХА в зависящем от времени магнитном поле возникают погрешности в измерениях температуры, вызываемые нагревом за счет индукционных токов. Подобные погрешности с использованием термопары магнитомягких пленок пермаллоев сводятся к минимуму. Следует отметить, что в диапазоне индукции магнитного поля 0...1.2 Т в пределах точности измерения нашей установки ( $1 \mu\text{V/K}$ ,  $\pm 0.2 \text{ K}$ ), какие-либо зависимости термоЭДС от магнитной проницаемости материалов термопары не выявлены.

## Заключение

Магнитомягкие гибкие ленты из пермаллоев Co–Fe и Ni–Fe являются подходящим материалом для изготовления термоэлектрических сенсоров. Термопары,

изготовленные из намагниченных тонких полосок сплавов Co–Fe и Ni–Fe, позволяют примкнуть к исследуемому парамагнитному или ферромагнитному объекту непосредственно, за счет магнитного взаимодействия. Тонкопленочная форма ветвей термопары в переменном магнитном поле позволяет минимизировать погрешности в измерениях температуры, вызываемые нагревом за счет индукционных токов.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Farhad Shir, Catherine Mavriplis, Lawrence H. Bennett. // Journ. Instrument. Sci. Technol. 2007. Vol. 33. P. 661–671.
- [2] Kollie T.G., Anderson R.L., Horton J.L., Roberts M.J. // Rev. Scient. Instrument. 2008. Vol. 48. P. 501. <https://doi.org/10.1063/1.1135063>
- [3] Samo Begus, Jovan Bojkovski, Janko Drnovsek, Gregor Gersa. // Measurement Sci. Technol. 2014. Vol. 25. N 3. DOI: 10.1088/0957-0233/25/3/035006
- [4] Gregor Gersak Gand, Samo Begus. // J. Thermophys. 2010. Vol. 311. P. 622–632.
- [5] Биронт В.С., Дроздова Т.Н., Блохина И.В., Лындина Е.Н., Якимов И.С., Пономарева С.В., Гусев А.О., Симаков Д.А. // J. Siberian Federal University. Engineer. Technol. 2009. P. 139–150.
- [6] Козлов А.Г., Лухвич А.А., Шарандо В.Т. В кн. Физические методы и средства неразрушающего контроля. М.: Наука и техника, 1976. С. 169–171.
- [7] Xiaomin Liu, Evans P, Zangari G. // IEEE Transactions on Magnetics. 2000. Vol. 36. N 5. P. 3479–3481.