

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. MAGNETIC MATERIALS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 3. С. 201–204.
ISSN 1609-3577. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-3-201-204

УДК 621.315.592:[621.317.44+621.317.49]

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА НЕДИАГОНАЛЬНЫЙ МАГНИТОИМПЕДАНС В АМОРФНЫХ ПРОВОДАХ

Магнитоимпедансный эффект в ферромагнитных аморфных микропроводах является идеальной основой для разработки высокочувствительных сенсоров слабых магнитных полей с разрешением до нескольких микроэрстед. Приведены результаты исследования температурной зависимости сигнала датчиков с магнито-чувствительным элементом на основе аморфных кобальт-содержащих микропроводов с геликоидальной магнитной анизотропией. Также рассмотрено и влияние температурной обработки на недиагональный магнитоимпеданс (МИ) в них. Установлено, что определенные режимы отжига МИ-датчиков, включающих микропровод с электрическими контактами и детектирующую катушку, увеличивают чувствительность выходного сигнала к осевому внешнему магнитному полю и уменьшают его зависимость от температуры. В процессе изучения данного явления была разработана методика термической обработки датчиков на основе аморфных микропроводов и проведено исследование влияния режимов отжига на чувствительность и температурную стабильность недиагонального магнитоимпеданса в микропроводах. После проведения термообработки при температуре отжига 160 °С в течение 2–3 мин наблюдали увеличение чувствительности датчиков к осевому внешнему полю на 25 % и снижение зависимости сигнала от температуры почти в 2 раза. Эти изменения связаны с релаксацией внутренних напряжений, которые определяют эффективную магнитную анизотропию аморфного МИ-провода.

Ключевые слова: магнитоимпедансный датчик, недиагональный магнитоимпеданс, аморфный микропровод, геликоидальная магнитная анизотропия.

© 2015 г. Н. А. Юданов, А. Т. Морченко, Л. В. Панина, В. Г. Костишин, С. А. Евстигнеева

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия

Введение

Эффект магнитного импеданса (МИ) заключается в изменении напряжения U на магнитном проводнике (диагональный МИ) или катушке, намотанной на магнитный проводник (недиагональный МИ), при прохождении по нему высокочастотного тока под воздействием внешнего магнитного поля напряженностью H [1, 2]. В аморфных микропроводах на основе кобальта МИ может достигать сотен процентов на мегагерцевых частотах, что обусловлено магнитомягкими свойствами и особой циркулярной магнитной анизотропией таких объектов [3]. Поэтому аморфные микропровода используют для разработки высокочувствительных сенсоров слабых магнитных полей с разрешением порядка нескольких микроэрстед [4, 5]. Однако МИ-эффект в микропроводах со стеклянной

оболочкой имеет значительную термочувствительность даже при температурах, значительно меньших, чем точка Кюри. Наличие температурной нестабильности может существенно ограничить применение таких сенсоров. Целью работы является разработка методик по уменьшению температурной зависимости МИ-датчика. Для улучшения температурной стабильности МИ ниже предложено использовать термический отжиг. В зависимости от режима отжига удастся значительно снизить температурную зависимость МИ в области рабочих температур (от –30 до 80 °С). В этом случае чувствительность $\Delta U/\Delta H$ сенсорных элементов к напряженности измеряемого магнитного поля также повышается.

Чувствительность МИ-элементов в значительной степени определяется типом магнитной анизотропии. В аморфных микро-

Юданов Николай Анатольевич — инженер, аспирант, e-mail: kolyan2606@mail.ru; Панина Лариса Владимировна; Морченко Александр Тимофеевич — кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, e-mail: dratm@mail.ru; Костишин Владимир Григорьевич — доктор физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой, e-mail: drvgkostishyn@mail.ru; Евстигнеева Светлана Алексеевна — студентка, e-mail: Svetlana_Evstigneeva95@mail.ru.

проводах магнитная анизотропия обусловлена магнитоэлектрическими взаимодействиями и зависит от распределения внутренних напряжений. Последние возникают в процессе затвердевания сплава и сильно зависят от соотношения диаметра металлической жилы и толщины стеклянной оболочки [6, 7]. Это связано с различием коэффициентов теплового расширения стекла и металла. Так, при уменьшении относительной толщины стеклянной оболочки внутренние напряжения снижаются, а чувствительность МИ увеличивается. Магнитная структура аморфных микропроводов может быть модифицирована за счет изменения внутренних механических напряжений в результате различных тепловых обработок [8, 9]. Отжиг приводит к релаксации внутренних напряжений, а отжиг в продольном магнитном поле позволяет индуцировать геликоидальную магнитную структуру проводов. Эта особенность имеет большое практическое значение для увеличения чувствительности МИ-элемента и разработки точных высокочувствительных сенсоров магнитных полей.

Следует отметить, что термический и термомагнитный отжиг являются наиболее технологичными, поскольку они позволяют проводить процесс обработки, не затрагивая конструкцию датчика как на чувствительном элементе, так и на собранном корпусированном сенсоре.

В результате тепловой обработки могут изменяться не только внутренние напряжения, но и константа магнитоэлектричества [10, 11]. Например, отжиг микропроводов состава $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{B}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,96}$ с общим диаметром 45 мкм и диаметром металлической жилы 42 мкм при температуре 200–300 °С в течение 5 мин приводит к изменению анизотропии с циркулярной на осевую, что подтверждается как поведением петли гистерезиса намагничивания провода, так и его МИ-характеристиками [9]. Такое преобразование, которое является неблагоприятным с точки зрения МИ-эффекта, объясняется изменением знака магнитоэлектрического параметра в результате релаксации внутренних напряжений. Таким образом, очень важно правильно определить необходимые режимы отжига.

Объекты и методы исследований

Недиагональный МИ представляет особый интерес с практической точки зрения. Соответствующий чувствительный элемент включает МИ-провод длиной менее 1 см с электрическими контактами для пропускания высокочастотного тока и детектирующую катушку. МИ-провод можно жестко фиксировать на подложке [12, 13]. Температурной обработке должен подвергаться весь чувствительный элемент. Микропровод состава $\text{Co}_{66,94}\text{Fe}_{3,83}\text{Ni}_{1,44}\text{B}_{11,57}\text{Si}_{14,59}\text{Mo}_{1,96}$ в стеклянной оболочке с общим диаметром 46 мкм и диаметром металлической жилы 40 мкм ис-

пользовали в качестве магнитоэлектрического элемента. Катушку из 65 витков из медного изолированного провода диаметром 40 мкм наматывали непосредственно на микропровод [14].

Для детального исследования влияния температуры отжига на поведение недиагонального МИ была разработана установка, представленная на рис. 1 (см. вторую стр. обложки). Эта установка состоит из магнитной системы с катушками Гельмгольца и блоком управления величиной магнитного поля, генератора сигналов для возбуждения провода, осциллографа для регистрации параметров выходного сигнала датчика, теплового фена с блоком управления и термодатчика с электронным измерителем температуры.

С помощью функционального генератора в микропровод посылается возбуждающий сигнал в виде гармонических колебаний частотой 20 МГц с различной величиной постоянной составляющей (тока смещения). Частота возбуждения соответствует резонансной частоте чувствительного элемента. Постоянная составляющая тока определяет величину кругового подмагничивающего поля, которое необходимо для контроля за доменной структурой микропровода. МИ-чувствительный элемент помещают в генератор магнитного поля H_{ex} , который выполнен в виде катушек Гельмгольца и блока управления магнитным полем [15]. При помощи блока контроля температуры задают требуемую температуру, нагреватель со встроенным нагревательным элементом формирует поток нагретого до заданной температуры воздуха, контроль температуры ведется при помощи цифрового термометра и термодатчика типа хромель-алюмель. Зависимость выходного сигнала от значения магнитного поля и температуры фиксируют при помощи осциллографа по максимальной амплитуде сигнала на его экране.

Термическая обработка заключается в плавном нагревании датчика (со скоростью, исключающей эффекты термоудара) до определенной температуры в отсутствие внешних магнитных полей, выдержки при заданной температуре и плавном остывании до комнатной температуры.

В ходе работы датчик нагревали и охлаждали со скоростью, не превышающей 1 К/с, в потоке воздуха внутри катушек Гельмгольца, которые обеспечивали компенсацию внешнего магнитного поля (магнитного поля Земли). Время выдержки составляло 3 мин.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 (см. вторую стр. обложки) показаны семейства зависимостей выходного сигнала недиагонального МИ-элемента от величины внешнего магнитного поля для различных температур обработки.

Как видно из рис. 2, чувствительность датчика в результате обработки при не очень высоких темпера-

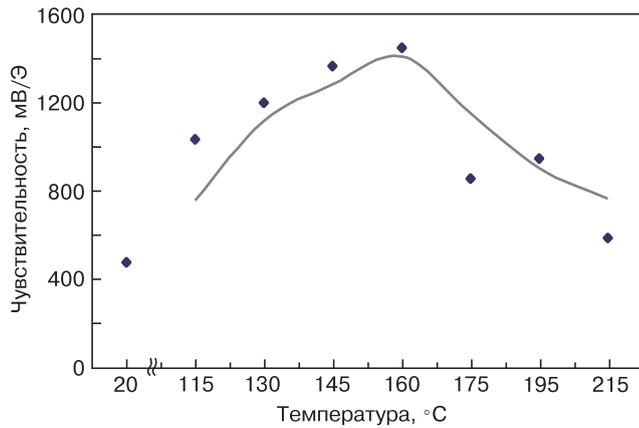


Рис. 3. Зависимость полученной чувствительности датчика от температуры обработки

Fig. 3. Sensitivity as a Function of Heat Treatment Temperature

турах несколько возрастает. Однако при увеличении температуры отжига чувствительность начинает падать. На рис. 3 показана зависимость достигнутой чувствительности датчика при комнатной температуре от температуры отжига. Максимум чувствительности наблюдается при температуре отжига ~ 160 °C и времени отжига 2—3 мин. Для проверки воспроизводимости результатов по увеличению чувствительности подобным образом было обработано 5 сенсоров. В среднем чувствительность после термообработки при 160 °C выросла на 800 мВ/Э.

Снижение чувствительности с дальнейшим ростом температуры может объясняться увеличением разброса направлений внутренних напряжений при релаксации, процессами рекристаллизации и изменением константы магнитострикции.

После проведения температурной обработки были исследованы МИ-характеристики датчика при различных температурах. Даже при незначительном нагревании выходной сигнал уменьшается. Это связано с изменением распределения внутренних напряжений, вызванных различием коэффициентов теплового расширения стекла и металла. Также

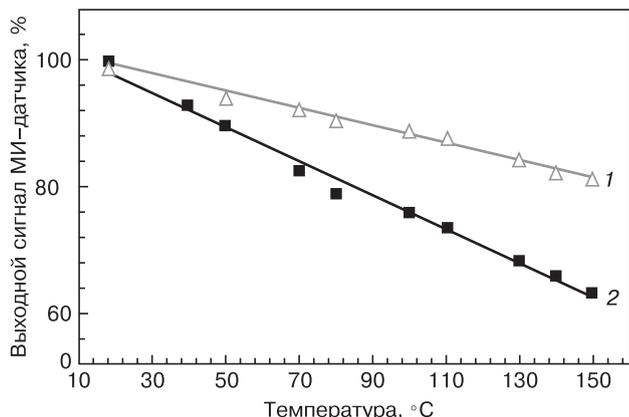


Рис. 4. Температурные зависимости сигнала МИ-датчика до (1) и после (2) проведения температурной обработки (в % к максимальной величине сигнала при комнатной температуре)

Fig. 4. MI Sensor Signal as a Function of Temperature (1) Before and (2) After Heat Treatment (% of Room Temperature Signal Magnitude)

на температурные зависимости может оказывать влияние возникновение дополнительных механических напряжений в области электрических контактов. На рис. 4 показано уменьшение выходного сигнала недиагонального МИ-сенсорного элемента при определенном значении напряженности магнитного поля с ростом температуры до и после отжига, которое происходит практически линейно с ростом температуры. Однако степень зависимости от температуры для отожженного МИ-элемента оказалась значительно меньшей (практически в два раза для используемых режимов отжига), поскольку в этом случае внутренние напряжения, возникающие из-за стеклянной оболочки и электрических контактов, заметно снижены.

Так, до проведения термообработки температурная нестабильность составляла 0,29 %/°C, после проведения термообработки эта величина уменьшилась почти вдвое — до 0,15 %/°C.

Заключение

Проведено исследование влияния режимов отжига на чувствительность и температурную стабильность недиагонального МИ в микропроводах со стеклянной оболочкой в конфигурации сенсорного элемента. Продемонстрировано увеличение чувствительности при температурах отжига ~ 160 °C в течение 2—3 мин. Установлено, что при этом происходит также улучшение температурной стабильности.

Библиографический список

1. **Makhnovskiy, D. P.** Field-dependent surface impedance tensor in amorphous wires with helical and circumferential anisotropy / D. P. Makhnovskiy, L. V. Panina, D. J. Mapps // *Phys. Rev.* – 2001. – V. 63. – P. 144424.
2. **Ipatov, M.** Low-field hysteresis in the magnetoimpedance of amorphous microwires / M. Ipatov, V. Zhukova, A. Zhukov, J. Gonzalez, A. Zvezdin // *Phys. Rev.* – 2010. – V. 81. – P. 134421.
3. **Pirota, K.** Magnetic properties and giant magnetoimpedance in a CoFeSiB glass-covered microwire / K. Pirota, L. Kraus, H. Chiriac, M. Knobel // *J. Magn. Mag. Mat.* – 2000. – V. 221, Iss. 3. – P. 243—247.
4. **Mohri, K.** Super MI sensor: recent advances of amorphous wire and CMOS-IC magneto-impedance sensor / K. Mohri, Y. Honkura, L. V. Panina, T. J. Uchiyama // *Nanoscience and Nanotechnology.* – 2012. – V. 12. – P. 7491—7495.
5. **Uchiyama, T.** Recent advances of pico-tesla resolution magneto-impedance sensor based on amorphous wire CMOS IC MI sensor / T. Uchiyama, K. Mohri, Y. Honkura, L. V. Panina // *IEEE Trans. Magn.* – 2012. – V. 48. – P. 3833—3839.
6. **Zhukova, V.** Optimization of giant magnetoimpedance in Co-rich amorphous microwires / V. Zhukova, A. Chizhik, A. Zhukov, A. Torcunov, V. Larin, J. Gonzalez // *IEEE Trans. Magn.* – 2002. – V. 38. – P. 3090—3092.
7. **Chiriac, H.** Magnetoelastic anisotropy of amorphous microwires / H. Chiriac, T. A. Ovari, A. Zhukov // *J. Magn. Mag. Mater.* – 2003. – V. 11. – P. 254—255.
8. **Talaat, A.** Tailoring of magnetic properties and GMI effect of Co-rich amorphous microwires by heat treatment / A. Talaat, V. Zhukova, M. Ipatov, J. M. Blanco, L. Gonzalez-Legarreta, B. Hernandez, J. J. del Val, J. Gonzalez, A. Zhukov // *J. Appl. Phys.* – 2014. – V. 41. – P. 115.
9. **Zhukov, A.** Tailoring of magnetic anisotropy of Fe-rich microwires by stress induced anisotropy / A. Zhukov, V. Zhukova, V. Larin, J. M. Blanco, J. Gonzalez // *Phys. Rev.* – 2006. – V. 24. – P. 384.
10. **Zhukov, A.** Tuning of magnetic properties and GMI effect of Co-based amorphous microwires by annealing / A. Zhukov, A. Ta-

laa, J. M. Blanco, M. Ipatov, V. Zhukova // *J. electronic mater.* – 2014. – V. 43, N 12. – P. 4532–4539.

11. **Zhukov, A.** Magnetostriction in glass-coated magnetic microwires / A. Zhukov, V. Zhukova, J. M. Blanco, A. F. Cobeno, M. Vazques, J. Gonzalez // *J. Magn. Mag. Mat.* – 2003. – V. 10 – P. 151–157.

12. **Юданов, Н. А.** Недиагональный магнитоимпеданс в аморфных проволоках и его применение в миниатюрных сенсорах слабых магнитных полей / Н. А. Юданов, А. А. Рудёнок, А. В. Колесников, Л. В. Панина, А. Т. Морченко, В. Г. Костишин // *Изв. РАН, сер. физич.* – 2014. – Т. 78, № 11.

13. **Панина, Л. В.** Использование явления недиагонального магнитоимпеданса для построения датчиков слабых магнитных

полей и токов / Панина Л. В., Юданов Н. А., Морченко А. Т., Костишин В. Г., Крутогин Д. Г., Рудёнок А. А. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов.* Межвуз. сб. науч. тр. – Тверь, 2013. – Вып. 5. С. 210–218.

14. **Yudanov, N. A.** High sensitivity magnetic sensors based on Off-diagonal magnetoimpedance in amorphous FeCoSiB wires / N. A. Yudanov, L. V. Panina, A. T. Morchenko, V. G. Kostishyn, P. A. Ryapolov // *J. Nano- and Electronic Physics* – 2013 – V. 5, N 4. – P. 04001 (4 pp).

15. **Yudanov, N. A.** Effect of bias fields on off-Diagonal magnetoimpedance (MI) sensor performance / N. A. Yudanov, A. A. Rudyonok, L. V. Panina, A. V. Kolesnikov, A. T. Morchenko, V. G. Kostishyn // *J. Nano- and Electronic Physics* – 2014 – V. 6, N 3. – P. 03046 (4 pp).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 13–08–01319. Л. В. Панина представляет данную работу в рамках государственного контракта по организации научной деятельности.

Авторы выражают благодарность В. С. Ларину, директору компании MFTI Ltd., за предоставленные образцы магнитных микропроводов.

Статья поступила в редакцию 06 октября 2015 г.

ISSN 1609–3577 *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki* = *Materials of Electronic Technics*. 2015, vol. 18, no. 3, pp. 201–204.

Effect of Annealing on Off-Diagonal Magnetoimpedance in Amorphous Microwires

Nikolay A. Yudanov¹ — Engineer (kolyan2606@mail.ru); **Aleksandr T. Morchenko**¹ — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Senior Researcher (dratm@mail.ru); **Larisa V. Panina**; **Vladimir G. Kostishin**¹ — Dr. Sci. (Phys.–Math.), Head of Department of the Technology of Electronic Materials at the MISiS (drvkgostishyn@mail.ru); **Svetlana A. Evstigneeva**¹ — student (Svetlana_Evstigneeva95@mail.ru)

¹**National University of Science and Technology «MISiS», 4 Leninskiy Prospekt, Moscow 119991, Russia**

Abstract. Magnetoimpedance (MI) effect in amorphous ferromagnetic microwires represents the ideal base for sensing technology and is currently used to develop high sensitive sensors of weak magnetic fields with a resolution up to few micro-Oersteds. The effect of heat treatment on off-diagonal MI in glass coated ferromagnetic amorphous microwires has been studied in order to improve MI sensitivity and temperature stability. We have shown the dependence of sensor signal on temperature. The wires had Co-based composition and internal stress induced helical or circumferential anisotropy. We have demonstrated that annealing of the entire sensing element including the electric contacts and the detection coil may improve the sensitivity of the output signal to an external magnetic field by about 25% and decrease its temperature sensitivity almost twofold in the –30...+80 °C range. These improvements require strict control of the annealing parameters. The best results are obtained for annealing at 160 °C for 2–3 minutes. The experimentally observed changes are related with stress relaxation during annealing, in particular, relaxation of the stresses occurring during solidification due to the difference in the thermal expansion coefficients of the metal core and the glass sheet.

Keywords: magnetoimpedance (MI) sensor, off-diagonal magnetoimpedance, amorphous microwire, magnetostriction, helical magnetic anisotropy.

References

1. Makhnovskiy D. P., Panina L. V., Mapps D. J. Field-dependent surface impedance tensor in amorphous wires with helical and circumferential anisotropy. *Phys. Rev.* 2001, vol. 63, p. 144424.
2. Ipatov M., Zhukova V., Zhukov A., Gonzalez J., Zvezdin A. Low-field hysteresis in the magnetoimpedance of amorphous microwires. *Phys. Rev.* – 2010, vol. 81. – P.134421.
3. Pirota K., Kraus L., Chiriac H., Knobel M. Magnetic properties and giant magnetoimpedance in a CoFeSiB glass-covered microwire. *J. Magn. Mag. Mat.* 2000, vol. 221, no. 3, pp. 243–247.
4. Mohri K., Honkura Y., Panina L.V., Uchiyama T. Super MI Sensor: Recent Advances of Amorphous Wire and CMOS-IC Magneto-Impedance Sensor. *J. Nanoscience and Nanotechnology*. 2012, vol. 12, pp. 7491–7495.
5. Uchiyama T., Mohri K., Honkura Y., Panina L.V. Recent Advances of Pico-Tesla Resolution Magneto-Impedance Sensor Based

on Amorphous Wire CMOS IC MI Sensor. *IEEE Trans. Magn.* 2012, vol. 48, pp. 3833–3839.

6. Zhukova V., Chizhik A., Zhukov A., Torcunov A., Larin V., Gonzalez J. Optimization of Giant Magnetoimpedance in Co-rich Amorphous Microwires. *IEEE Trans. Magn.* 2002, vol. 38, pp. 3090–3092.

7. Chiriac H., Ovari T.A., Zhukov A. Magnetoelastic anisotropy of amorphous microwires. *J. Magn. Magn. Mater.* 2003, vol. 11, pp. 254–255.

8. Talaat A., Zhukova V., Ipatov M., Blanco J. M., Gonzalez-Legarreta L., Hernando B., del Val J. J., Gonzalez J., Zhukov A. Tailoring of magnetic properties and GMI effect of Co-rich amorphous microwires by heat treatment. *J. Appl. Phys.* 2014, vol. 41, p. 115.

9. Zhukov A., Zhukova V., Larin V., Blanco J.M., Gonzalez J. Tailoring of magnetic anisotropy of Fe-rich microwires by stress induced anisotropy. *Phys. Rev.* 2006, vol. 24, p. 384.

10. Zhukov A., Talaat A., Blanco J. M., Ipatov M., Zhukova V. Tuning of Magnetic Properties and GMI Effect of Co-Based Amorphous Microwires by Annealing. *J. Electronic Materials*. 2014, vol. 43, no. 12, pp. 4532–4539.

11. Zhukov A., Zhukova V., Blanco J. M., Cobeno A. F., Vazques M., Gonzalez J. Magnetostriction in glass-coated magnetic microwires. *J. Magn. Mag. Mat.* 2003, vol. 10, pp. 151–157.

12. Yudanov N. A., Rudyonok A. A., Panina L. V., Kolesnikov A. V., Morchenko A. T., Kostishyn V. G. Off-diagonal magnetoimpedance in amorphous microwire and and his using in sensor by weak magnetic flap. *Izvestia RAN, seria fizicheskaya*. 2014, vol. 78, no. 11. (In Russ.)

13. Panina L. V., Yudanov N. A., Morchenko A. T., Kostishyn V. G., Krutogin D. G., Rudyonok A. A. Use the phenomena off-diagonal magnetoimpedance for building sensor by weak magnetic flap and current. *Fiziko-Himicheskie aspekti izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov mezhvuzovskii sbornik nauchnih trudov. Tver'*. 2013. Vol. 5, pp. 210–218.

14. Yudanov N. A., Panina L. V., Morchenko A. T., Kostishyn V. G., Ryapolov P. A. High Sensitivity Magnetic Sensors Based on Off-diagonal Magnetoimpedance in amorphous FeCoSiB Wires. *J. Nano- and Electronic Physics*. 2013, vol. 5, no. 4, p. 04001 (4pp)

15. Yudanov N. A., Panina L. V., Morchenko A. T., Kostishyn V. G., Ryapolov P. A. *J. Nano- and Electronic Physics*. 2013, vol. 5, p. 04004 (4 pp).

Acknowledgements. *The work was accomplished with partial support of RFFI Grant No. 13–08–01319.*

L.V. Panina presents this work within a State scientific activity contract.

The Authors wish to express their gratitude to Director of MFTI Ltd. V.S. Larin for providing magnetic microwire specimens.

Received October 6, 2015