

4. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy control. Addison Wesley Longman, Inc. 1998. 502 p.
5. Tan Y., Dong R., Chien H., He H. Neural networks based identification of hysteresis in human meridian systems. Int. Journal of Applied Mathematics and Computer Science. 2012. Vol. 22, no. 3, p. 685–694.
6. Jovanovic O., Identification of Dynamic System Using Neural Network // Architecture and Civil Engineering. 1997. Vol. 1, no. 4, p. 525–532.
7. Cao H., Kang L., Chen Y., Yu J. Evolutionary modeling of systems of ordinary differential equations with genetic programming. Genetic Programming and Evolvable Machines 1 (40) p. 309–337, 2000.
8. Parmar G., Prasad R., Mukherjee S. Order reduction of linear dynamic systems using stability equation method and GA. International Journal of computer and Information Engineering 1:1, 2007.
9. Reimer M., Rudzicz F. Identifying articulatory goals from kinematic data using principal differential analysis. Proceedings of Interspeech 2010, Makuhari Japan. 2010. P. 1608–1611.
10. Mineiro P., Movell J. R., Williams R. J. Modeling path distributions using partially observable diffusion networks: a Monte-Carlo approach. Technica IReport CogSci.UCSD-99.01, Department of Cognitive Science, UCSD, San Diego, 1999.
11. Saerens M. Viterbi algorithm for acoustic vectors generated by a linear stochastic differential equation. Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Detroit, 1995, p. 233–236.
12. Schwefel Hans-Paul Evolution and Optimum Seeking : New York: Wiley & Sons., 1995.
13. Ryzhikov I., Semenkin E. Evolutionary Strategies Algorithm Based Approaches for the Linear Dynamic System Identification. Adaptive and Natural Computing Algorithms, Springer: p. 477–483, 2013.
14. Ryzhikov I., Semenkin E. Modified Evolutionary Strategies Algorithm in Linear Dynamic System Identification. ICINCO (1): p. 618-621, 2012
15. Ryzhikov I., Semenkin E. The Application of Evolutionary Algorithm for the Linear Dynamic System Modelling. SIMULTECH: p. 234–237, 2012.

© Рыжиков И. С., 2014

УДК 629.19.22

ИССЛЕДОВАНИЯ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОРОШКОВ И ПОКРЫТИЙ НА ИХ ОСНОВЕ

В. Н. Саунин, С. В. Телегин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: telegin@sibsau.ru

Приведены исследования химического состава, морфологии и структуры порошков магнитомягких материалов из кристаллических сплавов 79НМ, 10СЮ и аморфного сплава 71КНСП для их применения в качестве исходных порошков при плазменном напылении ферромагнитных сердечников и магнитных экранов с высокой проницаемостью. Проведен анализ структуры и магнитных характеристик плазмонапыленных покрытий. Установлено, что порошки 79НМ, 10СЮ из-за наличия оксидных пленок по границам зерен имеют магнитную проницаемость около 100 Гс/Э, а в покрытиях она находилась в области 100–300 Гс/Э при напряженности магнитного поля от 0,5 до 3,0 Э. Порошки сплава 71КНСП отличались от кристаллических отсутствием оксидных образований на поверхности частиц и однородностью структуры и имели магнитную проницаемость до 9000 Гс/Э. Максимальная магнитная проницаемость напыленных образцов из порошков сплава 71КНСП при толщине покрытий от 200 до 600 мкм составила 2000–6000 Гс/Э при напряженности магнитного поля 0,1–0,35 Э.

Ключевые слова: магнитомягкие материалы, аморфный сплав, магнитная проницаемость, плазмотрон, напыление.

RESEARCH OF FERROMAGNETIC POWDER AND THE COATINGS ON THEIR BASIS

V. N. Saunin, S. V. Telegin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: telegin@sibsau.ru

This research shows the chemical composition, morphology and structure of magnetic materials powders of crystalline alloys 79NM, 10SYU and amorphous alloy 71KNSR for their use as starting powders during plasma spraying ferromagnetic cores and magnetic shields with high permeability. The analysis of the structure and magnetic properties of plazmonapylennyh coatings is carried out. It has been established that the powders 79NM, 10SYU due to the oxide films at the grain boundaries have a magnetic permeability of about 100 G / Oe, and in coatings, it is in the region of 100–300 G / Oe for the magnetic field strength of from 0.5 to 3.0 Oe. 71KNSR alloy powders are differed from lack of crystalline oxide formations on the surface of the particles and the homogeneity of the structure and have a magnetic permeability of up to 9000 gauss / Oe. The maximum permeability of the deposited samples 71KNSR alloy powder coatings at a thickness of 200 to 600 microns made 2000–6000 Gauss / Oe for the magnetic field intensity 0.1–0.35 Oe.

Keywords: magnetic materials, amorphous alloy, the magnetic permeability, plasma torch, sputtering.

Развитие науки и техники требует создания новых перспективных магнитомягких материалов для изделий элементной базы электронных приборов: сердечников магнитомодуляционных датчиков, магнитопроводов и магнитных экранов. Осуществлять компактирование детали сложной геометрической формы и слоев магнитных экранов возможно методом плазменного напыления исходными магнитомягкими порошками. Магнитные свойства таких изделий в значительной мере будут определяться качеством исходных порошков, полученных различными методами из прецизионных магнитных сплавов.

Для исследования были выбраны порошки магнитомягких материалов с высокой магнитной проницаемостью из кристаллических сплавов 79NM, 10СЮ и аморфного сплава 71КНСР (см. таблицу).

Химический состав исследуемых порошков

№ п/п	Марка порошка	Размер фракции порошка, мкм	Химический состав, %	
			По ТУ	Измеренный
1	79 NM	50–80	Ni – 68,6–70 Mo – 2,7 Si – 0,03–0,1 Fe – остальное	Ni – 78,5–80 Mo – 3,8–4,1 Si – 0,2 Fe – остальное
2	10СЮ	50–80	Si – 9,65 Al – 5,45 Fe – остальное	Si – 9,6 Al – 5,4 Fe – остальное
3	71КНСР	50–63	Co – 71 Ni – 12 Fe – 6 C – 3 Si – 7	Co – 72,5 Ni – 12,0 Fe – 6,5 C – 3,5 Si – 6,4 Mn – 0,3

Проводились металлографические, электронно-микроскопические исследования, а также исследования рентгеновского микроанализа (РМА) для исходных порошков и плазмонапыленных покрытий из них [1].

Частицы порошка 79NM имели преимущественно сферическую форму и отличались значительной неоднородностью по размеру (10–80 мкм). При анализе шлифов в частицах порошка обнаружены поры и неметаллические включения, которые в соответствии с выявленными признаками в светлом и темном полях

зрения можно классифицировать как оксиды, что подтвердилось данными РМА и явилось окислом железа. Микроструктура частиц после травления представляла собой однофазный γ -твердый раствор, отличающийся разнотельностью. Границы зерен сильно растравлены, что может быть связано с процессами окисления и образования приграничных областей с повышенной дефектностью структуры при получении порошкового материала. Проведенный РМА частиц выявил значительную неоднородность по химическому составу, например, содержание Mo колеблется в пределах 1,43–4,13 % вместо 2,7 % по технической документации. Наличие внутренней пористости, неметаллических включений, окисных слоев, неоднородной микроструктуры и отличий по химическому составу препятствует получению плотных качественных покрытий с необходимым уровнем магнитных свойств.

Частицы порошка 10СЮ имели осколочную форму, неоднородны по размеру (5–60 мкм) и характеризуются наличием большого количества микротрещин различной протяженности. Микроструктура частиц представляет собой однофазный γ -твердый раствор, при увеличении более чем в 1250 крат видно ячеистодендритное строение. Поверхность частиц покрыта оксидной пленкой различной толщины на основе Al, поэтому не представляется возможным оценить степень неоднородности порошка по химическому составу.

Частицы порошка 71КНСР осколочной формы и однородны по размеру (50–63 мкм). Травление частиц не позволило выявить структуру сплава. В сечении наблюдались интенсивные растравы поверхности, имеющие вид трещин. Можно предположить, что они образовались в местах расположения концентрированных неоднородностей, расслоения аморфной фазы.

Анализ поверхности шлифов плазмонапыленных покрытий из сплавов 79NM и 10СЮ фракцией 10–80 мкм показал, что они имеют идентичный характер. В процессе напыления частиц среди расплавленных попадают и оплавленные. Наблюдаются зазоры и пустоты, количество которых определяет пористость покрытия. Структура имеет характерное для плазменного покрытия слоистое строение. Между слоями оплавленных частиц наблюдаются темные прослойки, которые, как показал РМА, представляют собой в сплаве 79NM оксиды на основе железа, а в сплаве 10СЮ – оксиды на основе алюминия. Они

образовались в покрытии из-за наличия оксидных пленок, имеющих на частицах порошка в исходном состоянии. Выявленные оксидные пленки отрицательно влияют на свойства межслойных границ, способствуя образованию трещин.

Отличительным признаком покрытий из сплава 71КНСП является отсутствие слоистого строения [2]. Это можно объяснить отсутствием на поверхности исходного порошка окисной пленки, препятствующей плотному сцеплению частиц. Покрытие характеризуется лишь наличием пор, одной из причин образования которых можно считать попадание крупных частиц порошка в струю плазматрона [3].

Анализ магнитных характеристик показывает, что напыленные покрытия из сплавов 79НМ и 10СЮ в нетермообработанном состоянии имеют низкий уровень магнитных свойств; магнитная проницаемость при напряженности магнитного поля от 0,5 до 3,0 Э составила 100–300 Гс/Э. Магнитная проницаемость на образце-свидетеле в виде покрытия из нетермообработанной ленты сплава 79НМ толщиной 50 мкм, полученного намоткой в 5 слоев на тороидальную подложку (толщина полученного слоя 250 мкм), составила 100–150 Гс/Э в тех же полях, т. е. значения магнитной проницаемости примерно одинаковы (рис. 1).

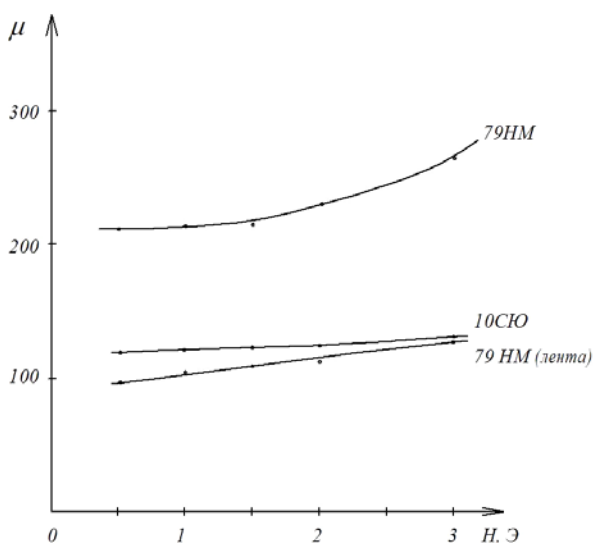


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости μ от величины магнитного поля H (Э) для кристаллических сплавов

Максимальный коэффициент экранирования напыленных покрытий в полях 3–4 Э равен 2. Коэрцитивная сила материалов покрытий: 79НМ – 0,4 Э, 10СЮ – 0,33 Э, а образца-свидетеля из ленты 79НМ – 0,45 Э.

Магнитные свойства, измеренные на образцах с покрытием из сплава 71КНСП, имеют следующие значения. Максимальная магнитная проницаемость напыленных в одинаковых условиях образцов при различной толщине покрытий от 200 до 600 мкм составила 2000–6000 Гс/Э при напряженности магнитного поля 0,1–0,35 Э. Образец-свидетель из ленты аморфного сплава 71КНСП имел магнитную проницаемость 9000 Гс/Э в поле 0,1 Э, т. е. в 1,5 раза выше, чем напыленный материал.

Полученные данные показывают, что с ростом толщины напыленного слоя значение максимальной магнитной проницаемости снижается (рис. 2) и одновременно наблюдается меньшая зависимость проницаемости от напряженности магнитного поля. При этом основные различия магнитной проницаемости наблюдаются в полях 1,5 Э, а затем значения проницаемости примерно одинаковы (от 1000 до 1500 Гс/Э в полях более 2 Э).

Максимальный коэффициент экранирования составил 90 в поле 6–7 Э, на образце из ленты величина коэффициента экранирования превышала 200 при той же напряженности магнитного поля.

Рассматривая зависимость коэффициента экранирования от толщины покрытия, можно заметить уменьшение максимального коэффициента экранирования (в полях до 10 Э) и повышение значения в полях напряженностью до 50 Э при меньшей зависимости K_s напыленного слоя от напряженности магнитного поля.

В полях от 40 Э значения K_s – от 5 до 25 при толщине покрытия от 200 до 660 мкм (рис. 3).

Результаты более детальных исследований плазмонапыленных покрытий порошков из сплава 71КНСП приведены в монографии [4]. На основании этих исследований была разработана оригинальная конструкция магнитного экрана.

При плазменном компактировании изделий электронной техники целесообразно применять в качестве исходного порошка сплав 71КНСП, магнитная проницаемость покрытий достигает 6000 Гс/Э.

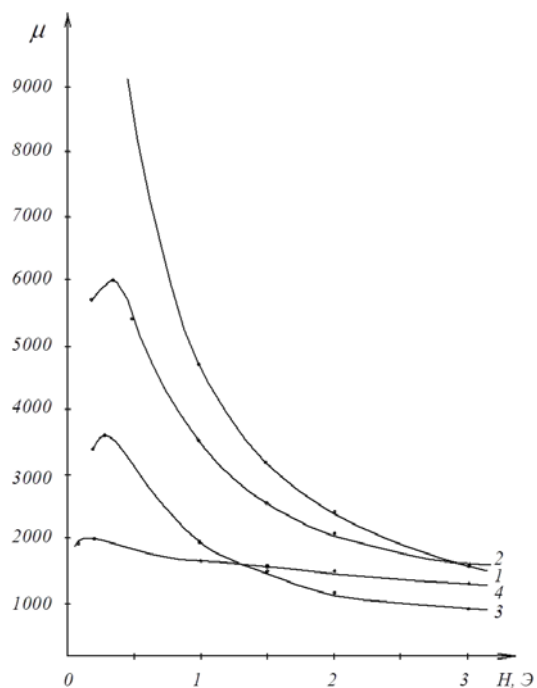


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости μ от величины напряженности магнитного поля H (Э) для покрытий из аморфного сплава 71КНСП при различной толщине покрытия: 1 – лента; 2 – 200 мкм; 3 – 400 мкм; 4 – 600 мкм

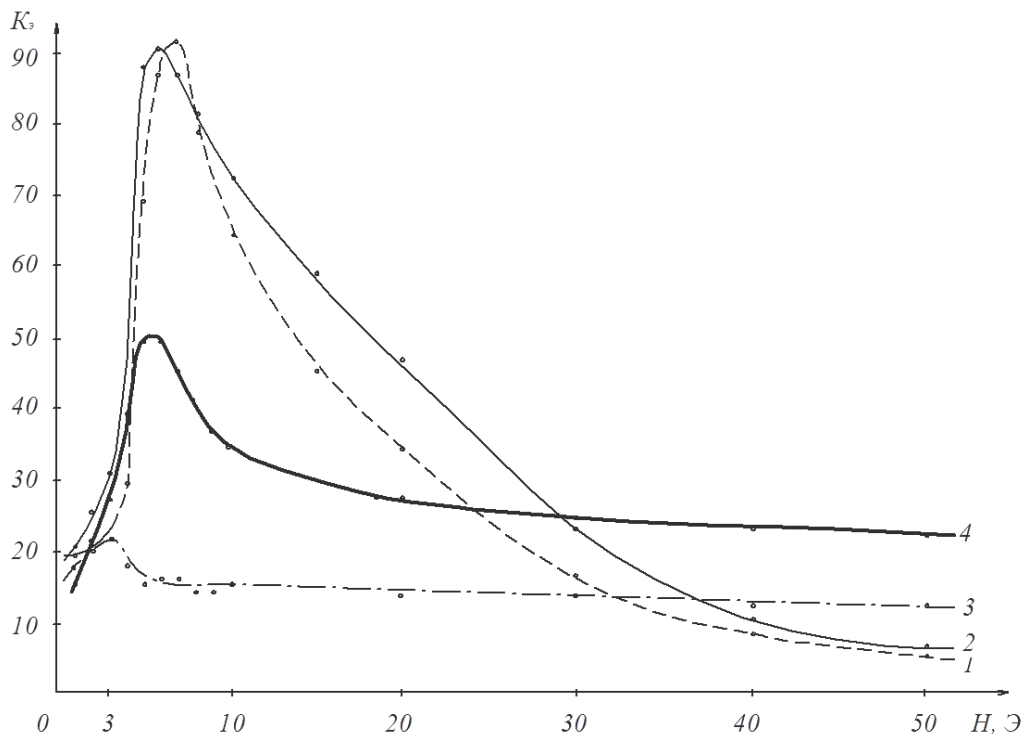


Рис. 3. Зависимость коэффициента экранирования K_s от напряженности магнитного поля H для сплава 71KHCP при различной толщине:
 1 – 200 мкм, 2 – 660 мкм, 3 – 600 мкм, 4 – 400 мкм

Библиографические ссылки

References

1. Саунин В. Н., Лепешев А. А., Телегин С. В. Технологические особенности плазменного напыления аморфных покрытий магнитных экранов летательных аппаратов // Вестник СибГАУ. 2001. Вып. 2. С. 83–87.
2. Саунин В. Н., Телегин С. В., Растобарова В. П. Модификация структуры и магнитных свойств при переделе аморфной ленты в плазменное покрытие // Вестник СибГАУ. 2006. Вып. 6 (13). С. 107–108.
3. Saunin V. N., Telegin S. V., Kalita V. I., Denisova E. A. Formation of bulk magnetically soft materials with nano-and amorphous structure using plasma spraying // Inorganic Materials: Applied Research. 2012. Vol. 3, no. 3. P. 201–209.
4. Саунин В. Н., Телегин С. В. Физика и механика управления структурой плазменных покрытий : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. – 200 с.

1. Saunin V. N., Lepeshev A. A., Telegin S. V. *Vestnik SibGAU*, 2001, no. 2, p. 83–87.
2. Saunin V. N., Telegin S. V., Rastobarova V. P. *Vestnik SibGAU*, 2006, no. 6 (13), p. 107–108.
3. Saunin V. N., Telegin S. V., Kalita V. I., Denisova E. A. Formation of bulk magnetically soft materials with nano-and amorphous structure using plasma spraying. *Inorganic materials: Applied research*, vol. 3, no. 3, p. 201–209.
4. Saunin V. N., Telegin S. V. *Fizika i mekhanika upravleniya strukturoy plazmennykh pokrytiy* (Physics and mechanics of controlling the structure of plasma coatings). Krasnoyarsk, Sib. gos. aerokosmich. un-t, 2012, 200 p.

© Саунин В. Н., Телегин С. В., 2014