



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-5-13>

УДК 539.216.2; 537.874

ФОРМИРОВАНИЕ И СТРУКТУРА ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ Fe–Ni И Fe–Co ДЛЯ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А. Д. ГЛАДИНОВ, О. В. БОЙПРАВ, В. А. БОГУШ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. Исследованы элементный состав и структура покрытий из сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co, сформированных электронно-лучевым испарением. Рассчитан азеотропный состав сплава Fe–Co. Показано, что сплав, содержащий 54 мас.% (~55 ат.%) Fe и 46 мас.% (~45 ат.%) Co, испаряется конгруэнтно. Установлено, что при скорости осаждения на подложки из полимерных материалов покрытия из указанных сплавов 5 нм/с и более поверхностный слой этих подложек разогревается до температуры выше 100 °С. Это приводит к деструкции поверхностного слоя полимера с выделением летучих составляющих и образованию рельефной поверхности покрытия. При скоростях осаждения покрытий от 0,5 до 1,0 нм/с температура подложек не превышает 50 °С, при этом снижается шероховатость поверхности покрытия и повышается его отражающая способность. Показано, что покрытия толщиной 150 нм из сплавов Fe₅₆Ni₄₄ и Fe₅₅Co₄₅ азеотропных составов, полученных при скорости нанесения 1,0 нм/с, имеют рентгеноаморфную (сплав системы Fe–Ni) или преимущественно аморфную (сплав системы Fe–Co) структуру. Исследован элементный состав покрытий и установлено, что в сплаве Fe–Ni отклонение в сторону уменьшения содержания железа в покрытии по отношению к азеотропному составу составило менее 5 %, а в сплаве Fe–Co – в сторону его увеличения – 18 %.

Ключевые слова: микроструктура, азеотропный состав, сплавы систем Fe–Ni и Fe–Co, тонкопленочный экран электромагнитного излучения, электронно-лучевое испарение.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гладинов, А. Д. Формирование и структура тонкопленочных покрытий Fe–Ni и Fe–Co для экранов электромагнитного излучения / А. Д. Гладинов, О. В. Бойправ, В. А. Богуш // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 2. С. 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-5-13>.

FORMATION AND STRUCTURE OF THIN-FILM Fe–Ni AND Fe–Co COATINGS FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION SCREENS

ANTON GLADINOV, OLGA BOIPRAV, VADIM BOGUSH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The elemental composition and structure of coatings made of Fe–Ni and Fe–Co alloys, formed by electron beam evaporation, were investigated. The azeotropic composition of the Fe–Co alloy was calculated. It was shown that the alloy containing 54 wt.% (~55 at.%) Fe and 46 wt.% (~45 at.%) Co evaporates congruently. It was found that at a deposition rate of coatings made of the above alloys on substrates made of polymer materials of 5 nm/s or more, the surface layer of these substrates is heated to a temperature above 100 °C. This leads to the destruction of the surface layer of the polymer with the release of volatile components and the formation of a relief coating surface. At coating deposition rates from 0.5 to 1.0 nm/s, the substrate temperature does not exceed 50 °C, while the surface roughness of the coating decreases and its reflectivity increases. It was shown that 150 nm thick coatings of Fe₅₆Ni₄₄ and Fe₅₅Co₄₅ alloys with azeotropic compositions obtained at a deposition rate of 1.0 nm/s have an X-ray amorphous (Fe–Ni system alloy) or predominantly amorphous (Fe–Co system alloy)

structure. The elemental composition of the coatings was studied, and it was found that in the Fe–Ni alloy, the deviation towards a decrease in the iron content in the coating relative to the azeotropic one was less than 5 %, while in the Fe–Co alloy, the deviation towards an increase was 18 %.

Keywords: microstructure, azeotropic composition, Fe–Ni and Fe–Co alloys, thin-film electromagnetic radiation screen, electron-beam evaporation.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Gladinov A., Boiprav O., Bogush V. (2026) Formation and Structure of Thin-Film Fe–Ni and Fe–Co Coatings for Electromagnetic Radiation Screens. *Doklady BGUIR*. 24 (2), 5–13. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-2-5-13> (in Russian).

Введение

Распространенными материалами с высокой магнитной проницаемостью, применяемыми для экранирования электромагнитного излучения (ЭМИ) низкой интенсивности, являются пермаллои. По составу пермаллои принято делить на низко- (40–50 мас.% Ni) и высоконикелевые (72–80 мас.% Ni) [1]. Основным показателем качества этих сплавов с точки зрения эффективности экранирования ЭМИ является величина относительной магнитной проницаемости [2, 3]. Зависимость магнитной проницаемости сплавов системы Fe–Ni от содержания никеля имеет два максимума: относительный и абсолютный. Область относительного максимума, ограниченная содержанием никеля от 40 до 50 мас.%, соответствует низконикелевому пермаллою, а область абсолютного максимума, ограниченная содержанием никеля от 72 до 80 мас.%, – высоконикелевому [4, 5]. Магнитные и электрические свойства пермаллоя напрямую зависят от его химического состава [6]. В [7] рассчитан азеотропный состав сплава системы Fe–Ni и показано, что элементный состав пленок, полученных методом электронно-лучевого испарения сплава Fe₅₅Ni₄₅ (мас.%), сохраняется, т. е. происходит его конгруэнтное испарение.

В связи с этим метод электронно-лучевого испарения в вакууме является одним из наиболее перспективных для формирования покрытий из магнитных материалов (Fe, Ni, Co и их сплавов) [8]. Он обладает возможностью нанесения многослойных, состоящих из магнитных и токопроводящих слоев, покрытий за один технологический цикл работы без нарушения вакуума в рабочей камере. Кроме того, при использовании исходных азеотропных сплавов метод электронно-лучевого испарения позволяет формировать покрытия с сохранением их элементного состава, что обеспечивает стабильность коэффициентов передачи и отражения экранов ЭМИ.

Сплавы с кобальтом также отличаются высокими значениями относительной магнитной проницаемости [9]. Однако влияние структурно-фазовых состояний покрытий из сплавов системы Fe–Co на их магнитные свойства еще недостаточно изучено.

Следует отметить, что микроструктура поверхности экрана ЭМИ, наряду с магнитной проницаемостью его компонентов, оказывает влияние на значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ [10, 11]. В связи с вышеизложенным, целью исследований являлись расчет азеотропного состава сплава системы Fe–Co, определение параметров формирования и изучение микроструктуры и свойств покрытий из сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co для экранов ЭМИ.

Материалы и оборудование для проведения экспериментальных исследований

Для анализа фазового состава покрытий использовался стационарный рентгеновский порошковый тета-тета дифрактометр GNR Explorer. Длина волны λ излучения CuK α составляла 0,1540 нм. Топология поверхности покрытий исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Tescan MIRA 3. Микроструктура литых образцов изучалась на металлографическом комплексе Autoscan с компьютерным анализом структуры. Исследование элементного состава покрытий проводилось на сканирующем электронном микроскопе Hitachi SU3400 в режиме вторичных электронов с энергией 15 кэВ.

Для получения сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co азеотропных составов приготавливали навески из никеля марки Н0, кобальта марки К0 и из АРМКО-железа. Сплавы получали методом литья в печи с индукционным нагревом в тиглях из диоксида циркония в атмосфере аргона. Разливку проводили в атмосфере аргона в графитовые кокилы с получением заготовок образцов диаметрами 10–15 мм и длиной 80–100 мм.

Тонкопленочные покрытия наносили методом электронно-лучевого испарения с помощью модернизированной установки вакуумного напыления ВУ-1А. Режимы нанесения покрытий: остаточное давление в вакуумной камере $5 \cdot 10^{-2}$ Па, время нанесения 30–300 с, скорость осаждения покрытий 0,5–5,0 нм/с. Температура испарения систем Fe–Ni и Fe–Co составляла 1600–1800 °С. Покрытия наносили на подложки из полимерных материалов (поликарбоната, полиметилметакрилата (ПММА)), предметного стекла и монокристаллического кремния Si(111). Толщина исследуемых покрытий из сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co составляла 150 нм.

Расчет сплава системы Fe–Co азеотропного состава

Расчет соотношения элементов в парах при нанесении слоев покрытий из сплавов системы Fe–Co проводили с использованием закона Рауля, поскольку, как и сплавы системы Fe–Ni, они представляют собой неограниченные твердые растворы [12]:

$$K_{A,B} = \frac{f_A \chi_A p_A}{f_B \chi_B p_B} \left(\frac{M_B}{M_A} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где $K_{A,B}$ – коэффициент испарения сплава; f_A, f_B – коэффициент активности компонентов A и B сплава соответственно; p_A, p_B – термодинамически равновесное давление паров компонентов A и B при температуре испарения; M_A, M_B, χ_A, χ_B – молекулярная масса и химическое количество компонентов A и B .

При испарении двухкомпонентных сплавов в соответствии с законом Рауля однородные по элементному составу пленки формируются только в тех случаях, когда $K_{A,B} \cong 1$. Зависимости давлений паров элементов Fe и Co от температуры приведены на рис. 1.

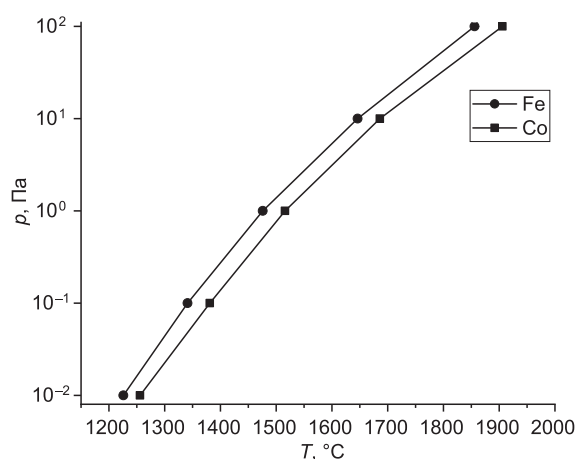


Рис. 1. Парциальные давления паров элементов Fe и Co при исследуемых температурах испарения
Fig. 1. Partial pressures of Fe and Co vapors at the evaporation temperatures studied

Диаграмма состояния системы Fe–Co представлена на рис. 2. Размеры радиусов элементов – $R_{Fe} = 0,1290$ нм и $R_{Co} = 0,1250$ нм. Следовательно, соотношение активностей Fe и Co при испарении сплавов системы Fe–Co будет равно

$$\frac{f_{Fe}}{f_{Co}} = \left(\frac{R_{Fe}}{R_{Co}} \right)^3 = \left(\frac{0,1290}{0,1250} \right)^3 = 1,099. \quad (2)$$

Необходимая скорость нанесения покрытий систем Fe–Co толщиной до 300 нм обеспечивается при давлении паров Fe и Co в пределах от 1 до 20 Па. Согласно рис. 2, температуры испарения сплавов системы Fe–Co должны находиться в диапазоне 1480–1580 °С. Среднее значение давления паров Fe в данном температурном диапазоне составляет 13 Па, а паров Co – 12 Па. Массы атомов элементов Fe и Co равны 55,85 и 58,93 а. е. м. соответственно. Подставляя все найденные значения в (1) для системы Fe–Co, получаем:

$$1,099 \cdot \left(\frac{13}{12}\right) \cdot \left(\frac{58,93}{55,85}\right)^{\frac{1}{2}} = 1,22x_{Co} = x_{Fe}. \quad (3)$$

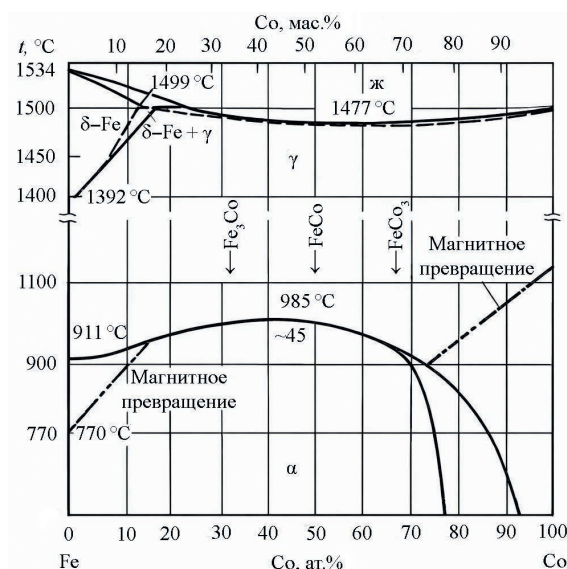


Рис. 2. Фрагмент двойной диаграммы состояния системы Fe–Co
Fig. 2. Fragment of the binary phase diagram of the Fe–Co system alloy

Из условия $x_{Fe} + x_{Co} = 1$ находим, что $x_{Fe} = 0,550$, $x_{Co} = 0,450$. Таким образом, согласно проведенному расчету, азеотропным в системе Fe–Co является сплав, содержащий 54 мас.% (~55 ат.%) Fe и 46 мас.% (~45 ат.%) Co.

Результаты исследований и их обсуждение

Микроструктуры в сечении вдоль оси литого образца сплава системы Fe–Ni представлены на рис. 3. Кристаллизация расплава начинается у поверхности его раздела с кокилем. При этом формируется столбчатая структура с размерами кристаллитов до 500 мкм (рис. 3, *b*). Затем формируется зона равновесных округлых кристаллитов с размерами до 200 мкм (рис. 3, *c*). Одинаковый внешний вид всех зерен свидетельствует о том, что структура однофазная и представляет собой твердый раствор никеля в железе.

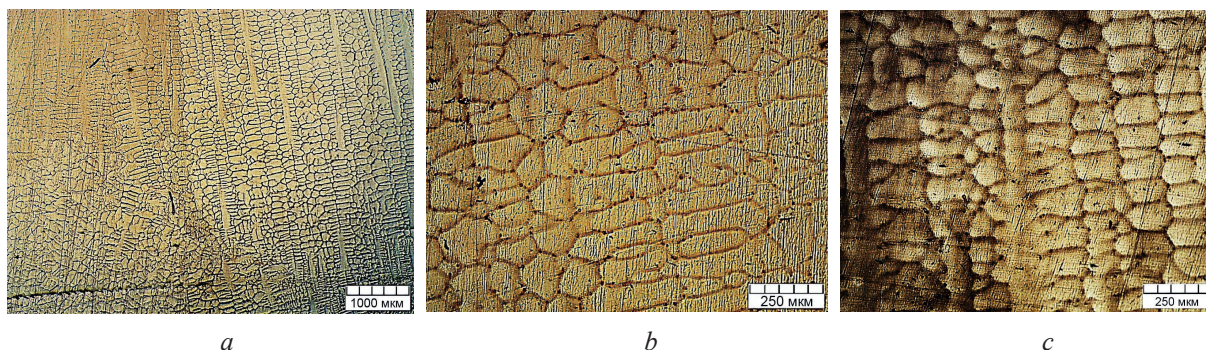


Рис. 3. Микроструктура литого образца сплава системы Fe–Ni: *a* – центральная зона образца; *b* – столбчатая структура вблизи поверхности; *c* – равновесная структура вблизи оси
Fig. 3. Microstructure of a cast Fe–Ni system alloy sample: *a* – central zone of the sample; *b* – columnar structure near the surface; *c* – equilibrium structure near the axis

Режимы нанесения пленок сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co на подложки оказывают влияние на формирование их структуры и, следовательно, на их относительную магнитную проницаемость. В связи с этим осаждение пленок сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co электронно-лучевым испарением проводили со скоростями 0,5; 1,0; 2,0 и 5,0 нм/с.

Микрорельефы поверхностей покрытий из сплава Fe–Ni толщиной 150 нм, осажденных с различными скоростями на подложки из поликарбоната, приведены на рис. 4.

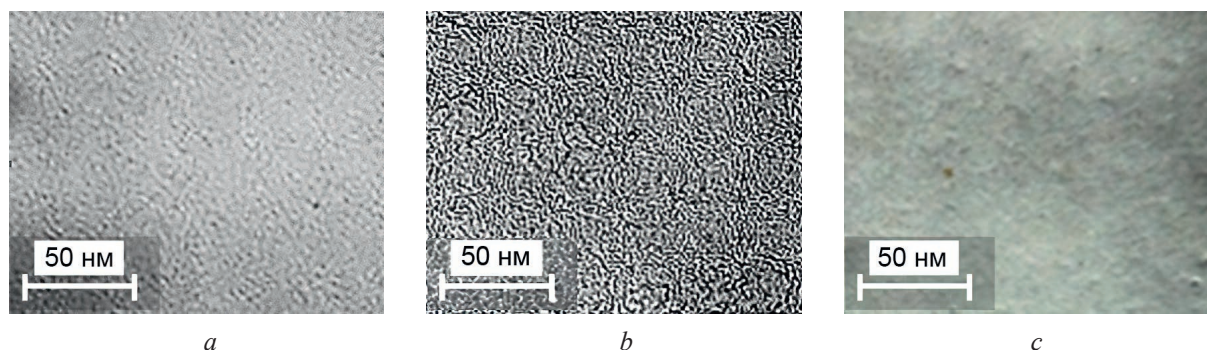


Рис. 4. Структуры покрытий из сплава системы Fe–Ni, полученных при различных скоростях осаждения, нм/с: *a* – 1,0; *b* – 2,0; *c* – 5,0
Fig. 4. Structures of Fe–Ni system alloy coatings obtained at different deposition rates, nm/s: *a* – 1.0; *b* – 2.0; *c* – 5.0

Установлено, что при скоростях осаждения покрытий 5 нм/с и более на подложки из полимерных материалов поверхностный слой подложек разогревается до температуры выше 100 °С. Это приводит к деструкции поверхностного слоя полимера с выделением летучих составляющих и образованию рельефной поверхности покрытия с бугорками сферической формы (рис. 4, *c*) [13]. При уменьшении скорости нанесения до 2 нм/с формируются пленки со сглаженным рельефом поверхности (рис. 4, *b*), однако температура подложки при этом остается достаточно высокой (~70 °С). При скоростях осаждения покрытий от 0,5 до 1,0 нм/с температура подложек не превышает 50 °С, при этом шероховатость поверхности покрытия снижается, что приводит к повышению его отражающей способности в видимом диапазоне длин волн (рис. 4, *a*). Таким образом, для получения воспроизводимых результатов скорость нанесения покрытий сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co не должна превышать 1,0–1,5 нм/с.

Дифрактограммы покрытий из сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co, полученных при скорости их нанесения 1,0 нм/с, приведены на рис. 5.

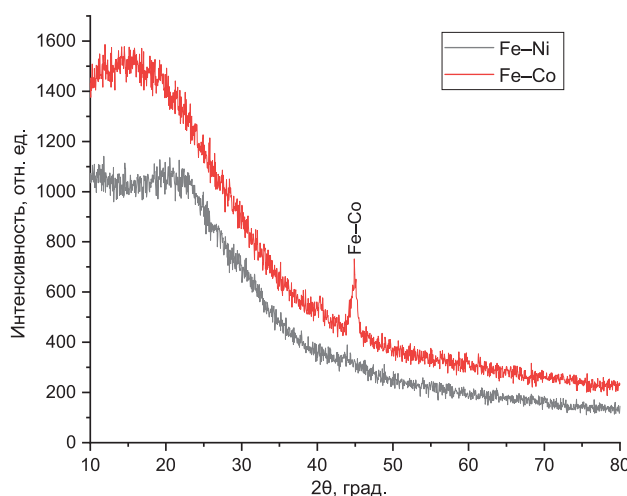


Рис. 5. Рентгеновская дифрактограмма покрытий из сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co, сформированных на подложках из предметного стекла
Fig. 5. X-ray diffraction pattern of Fe–Ni and Fe–Co alloy coatings formed on glass slide substrates

Поскольку отдельные дифракционные пики от межплоскостных расстояний кристаллов железа и никеля на дифрактограмме покрытия системы Fe–Ni отсутствуют, можно утверждать, что данное покрытие является рентгеноаморфным. На дифрактограмме покрытия системы Fe–Co (рис. 5) присутствует четкий пик, свидетельствующий об образовании при осаждении покрытия соединения FeCo. Результаты рентгенофазового анализа покрытия из сплава системы Fe–Co представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты рентгенофазового анализа покрытия из сплава системы Fe–Co
Table 1. Results of X-ray phase analysis of a coating made of Fe–Co system alloy

Pos. [°2 θ .]	Height [cts]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	Tip Width	Chemical Formula
44,9856	253,97	2,01350	100,00	0,7200	FeCo

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при принятых режимах нанесения формируются покрытия, имеющие рентгеноаморфную (сплав системы Fe–Ni) или преимущественно аморфную (сплав системы Fe–Co) структуру. Эффективность тонкопленочных экранов ЭМИ определяется прежде всего относительной магнитной проницаемостью покрытий, а у аморфных магнитных материалов она на два-три порядка выше, чем у поликристаллических, и может достигать значений до 10^5 .

Результаты масс-спектрального анализа элементного состава покрытий из сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co представлены на рис. 6.

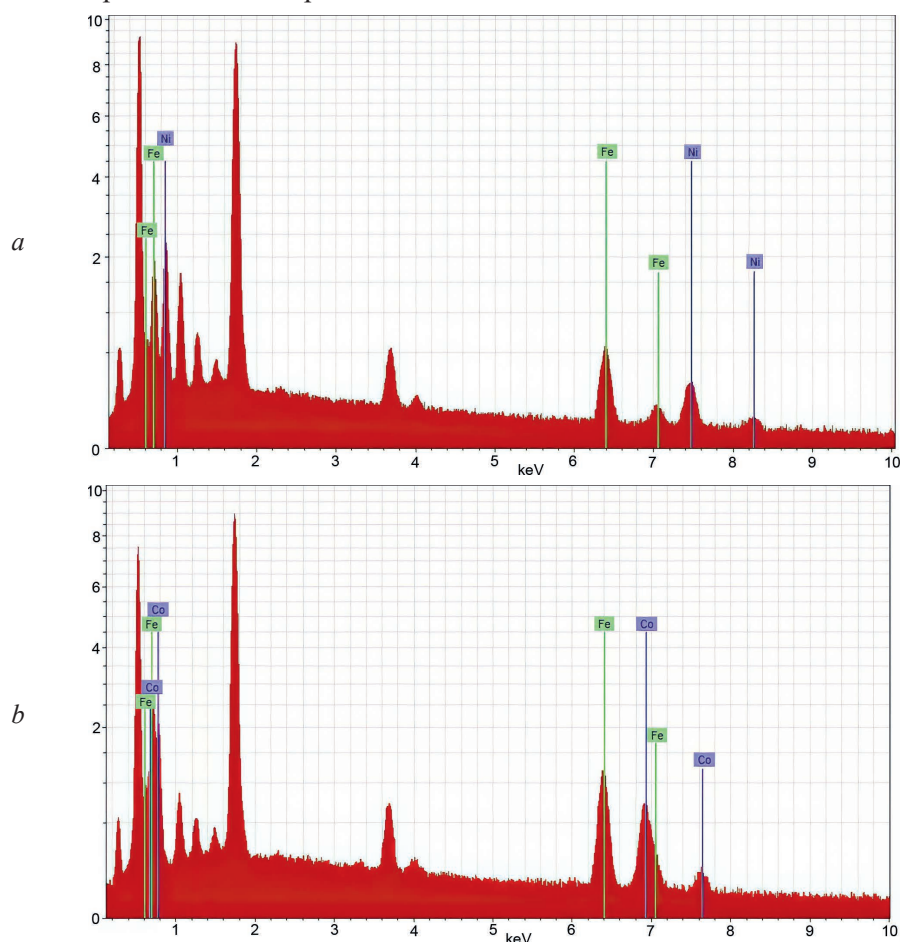


Рис. 6. Энергодисперсионные рентгеновские спектры покрытий из сплавов систем Fe–Ni (a) и Fe–Co (b) на подложках из предметного стекла
Fig. 6. Energy-dispersive X-ray spectra of coatings made from Fe–Ni (a) and Fe–Co (b) alloys on glass slide substrates

Результаты исследований элементного состава покрытий из сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co толщиной 150 нм, полученных при скорости осаждения 1,0 нм/с, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Стехиометрия состава покрытий из сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co на подложках из предметного стекла

Table 2. Stoichiometry of the composition of coatings of Fe–Ni and Fe–Co alloys on glass slide substrates

Система	Fe, ат. %	Ni, ат. %	Co, ат. %	Fe/Ni	Fe/Co
Fe–Ni	55,96	44,04	–	1,27	–
Fe–Co	59,13	–	40,87	–	1,446

В испаряемом электронно-лучевым методом сплаве $\text{Fe}_{56}\text{Ni}_{44}$ азеотропного состава расчетное соотношение атомов железа и никеля составляло 1,325. Экспериментально определенное отношение атомов железа к атомам никеля в покрытии $\text{Fe}/\text{Ni} = 1,27$. В рассчитанном сплаве системы Fe–Co азеотропного состава соотношение атомов железа и кобальта составляло 1,22. Экспериментально определенное отношение атомов железа к атомам кобальта в покрытии – $\text{Fe}/\text{Co} = 1,446$. В первом случае отклонение в сторону снижения содержания железа в покрытии составило менее 5 %, во втором – в сторону его увеличения – 18 %. Поскольку на элементный состав покрытия кроме давления паров элементов оказывают влияние и другие технологические параметры процесса осаждения (в частности, давление остаточной атмосферы в камере установки, расстояние от тигля до подложки и др.), полученные результаты можно считать удовлетворительными.

Значения S_{11} в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов с покрытиями из сплава системы Fe–Ni изменяются в пределах от (–0,9) до (–8,5) дБ, а экранов с покрытиями из сплава системы Fe–Co – от (–0,1) до (–3,7) дБ (рис. 7, а). Система Fe–Co, по сравнению с Fe–Ni, обладает более чем в два раза большим значением S_{11} в исследуемом диапазоне частот ЭМИ, что связано со структурно-фазовыми состояниями покрытий.

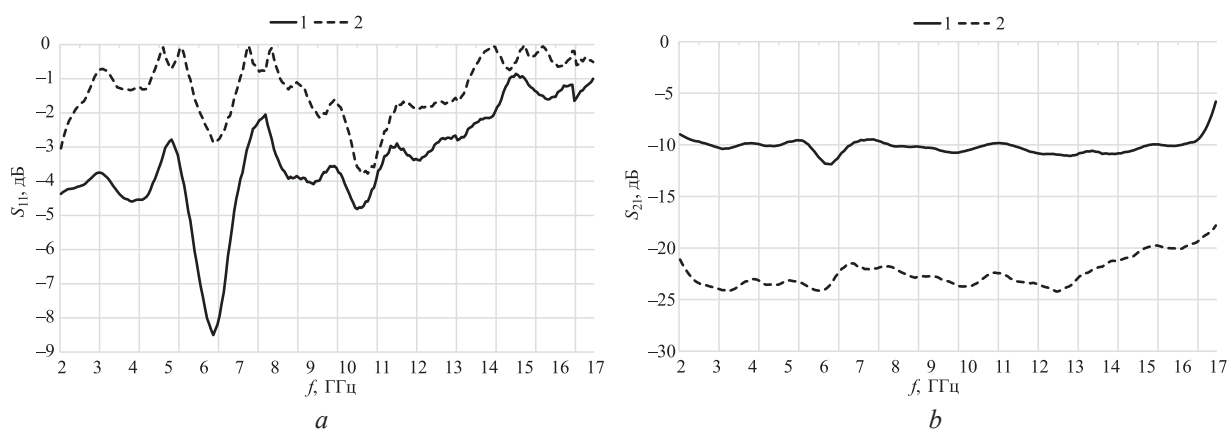


Рис. 7. Частотные зависимости в диапазоне 2–17 ГГц покрытий из сплавов систем Fe–Ni (1) и Fe–Co (2) коэффициентов: а – отражения S_{11} ; б – передачи S_{21}

Fig. 7. Frequency dependences in the range of 2–17 GHz of coatings made of Fe–Ni (1) and Fe–Co (2) alloys of the coefficients: а – reflection S_{11} ; б – transmission S_{21}

Покрытие системы Fe–Ni имеет преимущественно аморфную структуру, что подтверждается рентгенофазовым анализом, тогда как в покрытии системы Fe–Co присутствует кристаллическая фаза. Взаимодействие покрытия системы Fe–Ni с ЭМИ имеет лучшее согласование в диапазоне частот 2–17 ГГц и работает в первую очередь на поглощение ЭМИ за счет аморфной структуры и большей магнитной проницаемости слоев, тогда как покрытие системы Fe–Co за счет наличия кристаллической фазы обладает более высокой электрической проводимостью, что приводит к отражению большей части взаимодействующего с ним ЭМИ.

Значения S_{21} в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов с покрытиями из сплава системы Fe–Ni изменяются в пределах от (–5,0) до (–11,8) дБ, экранов с покрытиями из сплава системы Fe–Co – от (–17,8) до (–24,2) дБ (рис. 7, б). Большие значения S_{21} в диапазоне частот 2–17 ГГц экранов с покрытиями из сплава системы Fe–Ni по сравнению с экранами с покрытиями из сплава Fe–Co связаны с тем, что первые из указанных экранов по сравнению со свторами в меньшей степени отражают ЭМИ. Таким образом, экраны с покрытиями из сплава системы Fe–Co характеризуются большей эффективностью экранирования ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц по сравнению с экранами с покрытиями из сплава системы Fe–Ni.

Заключение

1. Рассчитан азеотропный состав сплава системы Fe–Co, содержащий 54 мас.% (~55 ат.%) Fe и 46 мас.% (~45 ат.%) Co. Изучено структурно-фазовое состояние исходных литых сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co азеотропных составов и полученных из них методом электронно-лучевого испарения покрытий. Установлено, что при кристаллизации расплава системы Fe–Ni в первую очередь на границе раздела с кокилем формируется столбчатая структура с размерами кристалли-

тов до 500 мкм. Затем формируется однофазная структура равновесных округлых кристаллитов твердого раствора никеля в железе размерами до 150 мкм.

2. Установлено, что при скоростях осаждения покрытий 5 нм/с и более на подложки из полимерных материалов их поверхностный слой разогревается до температуры выше 100 °С. Это приводит к деструкции поверхностного слоя полимера с выделением летучих составляющих и образованию рельефной поверхности покрытия. При скоростях осаждения покрытий от 0,5 до 1,0 нм/с температура подложек не превышает 50 °С, что способствует формированию покрытий с меньшей шероховатостью. Показано, что при установленных в работе оптимальных режимах нанесения покрытий (а именно, остаточном давлении в камере $5 \cdot 10^{-2}$ Па, времени нанесения 150 с и скорости осаждения 1,0 нм/с) формируются покрытия, имеющие рентгеноаморфную (сплав системы Fe–Ni) или преимущественно аморфную (сплав системы Fe–Co) структуру. Исследован элементный состав покрытий и установлено, что в сплаве системы Fe–Ni отклонение в сторону снижения содержания железа в покрытии по отношению к азеотропному составу менее 5 %, а в сплаве системы Fe–Co – в сторону его увеличения – 18 %.

3. Установлено, что покрытия из сплава системы Fe–Co имеют высокую эффективность отражения электромагнитного излучения по сравнению с покрытиями из сплава системы Fe–Ni и могут быть использованы при изготовлении защитных экранов электромагнитного излучения с улучшенными массогабаритными характеристиками, например, в устройствах авиационной и космической техники [14].

Список литературы

1. Лившиц, Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин, Я. Л. Липецкий. М.: Металлургия, 1980.
2. Кечиев, Л. Н. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры. Инженерное пособие / Л. Н. Кечиев. М.: Грифон, 2019.
3. Винников, В. В. Основы проектирования РЭС. Электромагнитная совместимость и конструирование экранов / В. В. Винников. СПб.: СЗГУ, 2006.
4. Никитина, Е. П. Материаловедение / Е. П. Никитина. Екатеринбург: УрГУПС, 2016.
5. Аксенова, Е. Н. Общая физика. Электричество и магнетизм / Е. Н. Аксенова. М.: Лань., 2018.
6. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. СПб.: Лань, 2001.
7. Gladinov, A. D. S-Parameters of Flexible Electromagnetic Radiation Shields with Fe–Ni System Coating / A. D. Gladinov, O. V. Voiprav, V. A. Bogush // *Materials Physics and Mechanics*. 2024. Vol. 52, Iss. 5. P. 74–82.
8. Гладинов, А. Д. Характеристики отражения и передачи многослойных тонкопленочных экранов электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне / А. Д. Гладинов, О. В. Бойправ, В. А. Богуш // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 6. С. 56–64. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-56-64>.
9. Преображенский, А. А. Магнитные материалы / А. А. Преображенский. М.: Высш. шк., 1965.
10. Потапов, А. А. Многократное рассеяние волн во фрактальных дискретных случайно-неоднородных средах / А. А. Потапов // *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2018. № 1. С. 3–21.
11. Flexible Double-Layered Microwave Absorbers Based on Foiled Materials with Mechanically Treated Surface / O. Voiprav [et al.] // *New Materials, Compounds and Applications*. 2023. Vol. 7, Iss. 2. P. 100–110.
12. Диаграммы состояния двойных металлических систем / Под общ. ред. Н. П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996–1997.
13. Strain Rate and Temperature Dependent Tensile Failure of a Short Glass Fiber Reinforced Polyamide Thermoplastic Composite / G. Mustafa [et al.] // *Materials Science Forum*. 2024. Vol. 1119. P. 93–98.
14. Hasanov, M. H. Algorithm Design Nanosatellite Based On Radio Frequency and Optical Communication / M. H. Hasanov, N. A. Atayev // *Problems of Information Technology*. 2022. Vol. 13, No 2. P. 61–68.

Поступила 26.02.2026

Принята в печать 16.03.2026

References

1. Livshitz B. G., Kraposhin V. S., Lipetsky I. L. (1980) *Physical Properties of Metals and Alloys*. Moscow, Metallurgy Publ. (in Russian).
2. Kechiev L. N. (2019) *Shielding of Electronic Equipment. Engineering Manual*. Moscow, Griffin Publ. (in Russian).
3. Vinnikov V. V. (2006) *Fundamentals of RES Design. Electromagnetic Compatibility and Shield Design*. Saint Petersburg, SZGU Publ. (in Russian).

4. Nikitina E. P. (2016) *Materials Science*. Yekaterinburg, Ural State Transport University Publ. (in Russian).
5. Aksenova E. N. (2018) *General Physics. Electricity and Magnetism*. Moscow, Lan Publ. (in Russian).
6. Pasyukov V. V., Sorokin V. S. (2001) *Materials of Electronic Engineering*. Saint Petersburg, Lan Publ. (in Russian).
7. Gladinov A. D., Boiprav O. V., Bogush V. A. (2024) S-Parameters of Flexible Electromagnetic Radiation Shields with Fe–Ni System Coating. *Materials Physics and Mechanics*. 52 (5), 74–82.
8. Gladinov A. D., Boiprav O. V., Bogush V. A. (2025) Reflection and Transmission Characteristics of Multilayer Thin-Film Screens of Electromagnetic Radiation in the Microwave Range. *Doklady BGUIR*. 23 (6), 56–64. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-6-56-64> (in Russian).
9. Preobrazhensky A. A. (1965) *Magnetic Materials*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. (in Russian).
10. Potapov A. A. (2018) Multiple Scattering of Waves in Fractal Discrete Randomly Inhomogeneous Media. *Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*. (1), 3–21 (in Russian).
11. Boiprav O., Hasanov M., Bogush V., Lynkou L. (2023) Flexible Double-Layered Microwave Absorbers Based on Foiled Materials with Mechanically Treated Surface. *New Materials, Compounds and Applications*. 7 (2), 100–110.
12. Lyakishev N. P. (ed.) (1996–1997) *State Diagrams of Binary Metallic Systems*. Moscow, Mashinostroenie Publ. (in Russian).
13. Mustafa G., Yiğit G., Servet Y., Özkan D., Namazov S. (2024) Strain Rate and Temperature Dependent Tensile Failure of a Short Glass Fiber Reinforced Polyamide Thermoplastic Composite. *Materials Science Forum*. 1119, 93–98.
14. Hasanov M. H., Atayev N. A. (2022) Algorithm Design Nanosatellite Based on Radio Frequency and Optical Communication. *Problems of Information Technology*. 13 (2), 61–68.

Received: 26 February 2026

Accepted: 16 March 2026

Вклад авторов

Гладинов А. Д. рассчитал азеотропный состав сплава системы Fe–Co, провел исследование структуры и свойств покрытий из сплавов систем Fe–Ni и Fe–Co.

Бойправ О. В. оказала помощь в интерпретации результатов измерений и написании статьи.

Богущ В. А. определил задачи, которые необходимо было решить в ходе проведения исследований, а также принимал участие в интерпретации результатов.

Authors' contribution

Gladinov A. calculated the azeotropic composition of the Fe–Co alloy and studied the structure and properties of coatings made from Fe–Ni and Fe–Co alloys.

Boiprav O. assisted in interpreting the measurement results and writing the article.

Bogush V. defined the objectives that needed to be addressed during the research and participated in the interpretation of the results.

Сведения об авторах

Гладинов А. Д., асп. каф. защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Бойправ О. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. защиты информации, БГУИР

Богущ В. А., д-р физ.-мат. наук, проф., ректор БГУИР

Information about the authors

Gladinov A., Postgraduate of Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Boiprav O., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of Information Protection Department, BSUIR

Bogush V., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Rector of the BSUIR

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293–89–38
E-mail: a.gladinov@bsuir.by
Гладинов Антон Дмитриевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293–89–38
E-mail: a.gladinov@bsuir.by
Gladinov Anton