

УДК 620.179.16

Ильясов Р.С., Бабкин С.Э., Вострокнутова О.Н.

ВЛИЯНИЕ ОДНООСНЫХ И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ В ФЕРРОМАГНЕТИКАХ

Получены экспериментальные данные, демонстрирующие влияние упругого растяжения на эффективность ЭМАП в модельных образцах поликристаллических ферромагнетиков с различным знаком магнитострикции насыщения в зависимости от их магнитного состояния при наличии и отсутствии внутренних напряжений и дано качественное описание полученных зависимостей на основе феноменологической модели ЭМАП.

Ключевые слова: электромагнитно-акустическое преобразование (ЭМАП), электродвижущая сила (ЭДС), электромагнитно-акустический (ЭМА), магнитострикция, анизотропия, полевые зависимости, скин-слой, никель, пермендюр, пермаллой.

Experimental data show effect of elastic strain on the effectiveness of the EMAT in the standart samples of polycrystalline ferromagnetic materials with different signs of saturation magnetostriction, depending on their magnetic state in the presence and absence of internal stress and it given a qualitative description of the dependences obtained on the basis of the phenomenological model of EMAT.

Keywords: electromagnetic-acoustic transformation (EMAT), electromotive force (emf), electromagnetic-acoustic (EMA), magnetostriction, anisotropy, field dependence of the, skin depth, nickel, permendur, permalloy.

Влияние приложенных σ_0 и внутренних σ_i напряжений на статическую магнитострикцию λ от в 3d-металлах исследовано достаточно полно как экспериментально, так и теоретически [1]. Магнитострикцию, как правило, измеряют методом тензометрии, поэтому для практических приложений этот параметр неудобен, особенно в сложных и протяженных технических системах, когда есть необходимость сканирования, при наличии динамических нагрузок и вариации температуры. В этих случаях целесообразно обратиться к бесконтактным методам, основанным на электромагнитно-акустическом преобразовании (ЭМАП). Действительно, в ферромагнитных металлах электромагнитная генерация ультразвука осуществляется за счет взаимодействия магнитной, упругой и магнитоупругой подсистем. Наряду с внешним магнитным полем и температурой, напряжения, приложенные к магнетику, определяют состояние указанных подсистем и характеристики их взаимодействия, а следовательно, закономерности ЭМАП.

Несмотря на то, что связь ЭМАП с приложенными и внутренними напряжениями очевидна и экспериментально продемонстрирована в нескольких работах, например в [2-4], целостного представления о закономерностях этого явления нет. Сведения о влиянии приложенных напряжений на основной параметр ЭМАП – эффективность преобразования, которая при двойном преобразовании определяется как ЭДС, наводимая в приемной катушке, порой противоречат друг другу. В работах [2, 3] в качестве параметра оценки статических напряжений σ_0 предлагаются некие критические поля, являющиеся производными от полевых зависимостей эффективности ЭМАП, а не само значение эффективности. Например, в работе [2] это значение напряженности магнитного поля, при котором достигается установленный уровень сигнала ЭМАП относительно максимума полевой зависимости. В работе [4] приводятся экспериментальные данные, указывающие на неоднозначный характер изменения эффективности ЭМАП от приложенных напряжений

в зависимости от магнитного состояния материала при неизменном знаке произведения $\lambda_s \sigma_0$ (λ_s – магнитострикция насыщения). Аналитическое описание поведения ЭДС двойного ЭМАП как функции σ_0 и σ_i , предпринятое в этой же работе, согласуется с экспериментом только в части изотропно распределенных внутренних напряжений. Остается открытым ряд вопросов: почему, например, в никеле при упругом растяжении сигнал ЭМАП в слабых полях уменьшается, а в сильных полях растет [3, 4]; как влияет на характер подобных зависимостей изменение знака магнитострикции насыщения и изменение уровня внутренних напряжений.

Настоящая работа предпринята с целью попытаться разрешить имеющиеся противоречия и ответить на поставленные вопросы. В качестве объектов исследования были выбраны материалы, отличающиеся знаком и величиной λ_s : никель ($\lambda_s < 0$), пермаллой 50НП, 65НП, 75НП, пермендюр 49К2Ф ($\lambda_s < 0$), как в состоянии поставки, так и после отжига при 1000°C.

Образцы в форме пластин размерами 20×150 мм и толщиной от 0.35 до 1 мм намагничивались тангенциальным магнитным полем H соленоида. Одноосное упругое растяжение, совпадающее с направлением магнитного поля, создавалось с помощью специально изготовленного устройства. С помощью двух индуктивных преобразователей проходного типа (секционные катушки противофазной намотки), расположенных на некотором удалении друг от друга, возбуждалась и принималась симметричная нулевая мода Лэмба (геометрия $k \parallel H \parallel h_{\parallel} \parallel \sigma_0$, где k – волновой вектор S_0 моды, h_{\parallel} – тангенциальная составляющая переменного магнитного поля). Во всех экспериментах использовалась импульсная методика (частота заполнения радиоимпульса 2,5 МГц), что позволило исключить влияние демпфирования образца захватывающими устройствами на результаты измерений. Измеряли два вида зависимостей – зависимости ЭДС двойного ЭМАП от поляризуемого поля при постоянной рас-

тягивающей нагрузке $E(H)$ и зависимости этого же параметра от приложенных напряжений при постоянном поле E (σ_0). Полученные зависимости сопоставлялись с кривыми статической магнитострикции $\lambda(H)$, измеренными методом тензометрии при постоянной величине σ_0 , в том числе при $\sigma_0 = 0$.

Полевые зависимости ЭДС двойного ЭМАП для никеля и пермендюра в состоянии поставки, измеренные при различных нагрузках, приведены на рис. 1 и 2, относительное изменение E в зависимости от σ_0 при различных значениях постоянного поля – на рис. 3, 4 (кривые 1-3 и 1-4 соответственно).

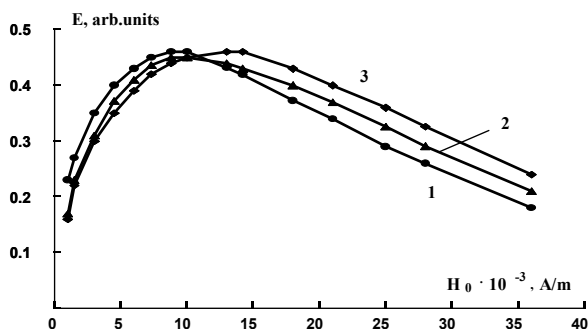


Рис. 1. Полевые зависимости ЭДС двойного ЭМАП в никеле в состоянии поставки при различных напряжениях растяжения: 1 – 0; 2 – 29; 3 – 50 МПа

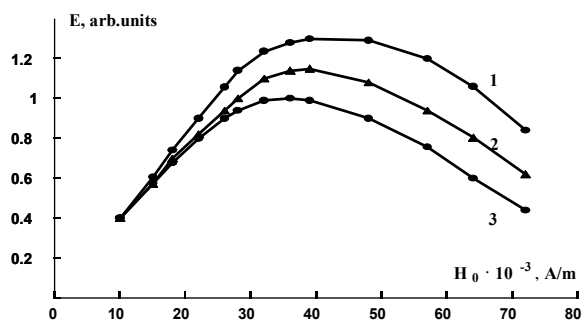


Рис. 2. Полевые зависимости ЭДС двойного ЭМАП в пермендюре 49К2Ф в состоянии поставки при различных напряжениях растяжения: 1 – 0; 2 – 50; 3 – 90 МПа

Сравнение результатов для никеля и пермендюра показывает, какие отличия зависимостей $E(H)$ и $E(\sigma_0)$ связаны со знаком λ_s . В никеле ($\lambda_s < 0$) при увеличении растягивающих напряжений ЭДС двойного ЭМАП в слабых магнитных полях уменьшается, в сильных полях растет, а в области максимума кривой $E(H)$ поведение E неоднозначно. При этом максимум ЭДС смещается в область сильных полей (поле, соответствующее максимуму, H_{max} , увеличивается). В пермендюре ($\lambda_s > 0$) практически во всем диапазоне полей с ростом σ_0 сигнал уменьшается и лишь в очень малых полях E имеет тенденцию к увеличению (рис. 4, кривая 1), при этом H_{max} уменьшается. Подобные же зависимости получены для сплавов 50НП, 65НП, 75НП.

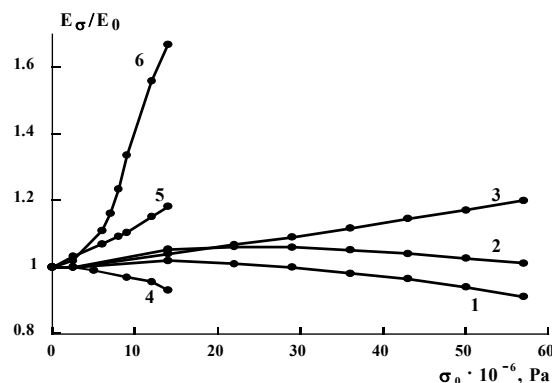


Рис. 3. Зависимость относительного изменения ЭДС двойного ЭМАП от напряжений растяжения в никеле в различных поляризующих полях (1, 2, 3, – в состоянии поставки; 4, 5, 6 – после отжига): 1 – 2.9; 2 – 7.2; 3, 6 – 21.6; 4 – 1.4; 5 – 4.3×10^3 А/м

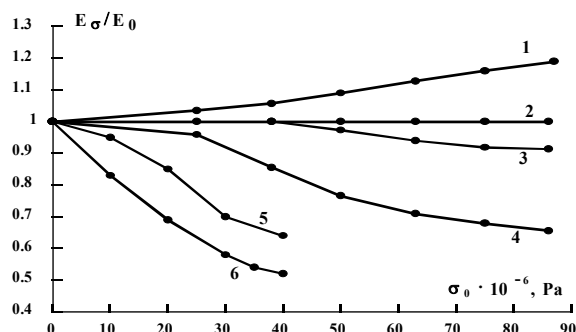


Рис. 4. Зависимость относительного изменения ЭДС двойного ЭМАП от напряжений растяжения в никеле в различных поляризующих полях (1-4 – в состоянии поставки; 5, 6 – после отжига): 1 – 14.4; 2 – 21.6; 3 – 36; 4 – 72; 5 2.2; 6 – 10.8×10^3 А/м

Качественно объяснить динамику полевых зависимостей ЭДС двойного ЭМАП под влиянием напряжений можно на основе модели явления двойного ЭМАП [5, 6]. Для данной геометрии эксперимента ЭДС двойного ЭМАП описывается следующим упрощенным выражением:

$$E \sim \frac{\delta^2 \chi_r^2}{\chi_d^2} \left(\frac{\partial \lambda}{\partial H} \right)^2 h, \quad (1)$$

где χ_r – обратимая магнитная восприимчивость; $\chi_d = \partial M / \partial H$ – дифференциальная магнитная восприимчивость; $\delta = \sqrt{2} / \sqrt{\mu_0 \mu_r \sigma_e \omega}$ – толщина скин-слоя; μ_0 – магнитная постоянная; $\mu_r = \chi_r + 1$ – обратимая магнитная проницаемость вдоль поляризующего поля; σ_e – электропроводность; ω – циклическая частота; λ – продольная магнитострикция, h – амплитуда переменного магнитного поля.

Вклады отдельных характеристик ферромагнетика в формирование полевой зависимости ЭДС двойного ЭМАП неравнозначны. В области полей, приле-

гающих к максимуму эффективности преобразования, ЭМАП реализуется за счет обратимых процессов вращения. В этой области обратимая и дифференциальная восприимчивости ведут себя одинаково и слабо зависят от поля, поэтому основную роль в формировании ЭМА сигнала играет магнитоупругая постоянная $\partial\lambda/\partial H$ (далее используется обозначение $d = \partial\lambda/\partial H$). Влияние дифференциальной магнитной проницаемости на зависимость ЭМАП в слабых полях будет рассмотрено ниже.

Проанализируем изменение магнитоупругой постоянной d исходя из того, что основную роль в формировании ЭМАП играют обратимые процессы вращения (слабый вклад процессов смещения экспериментально показан и проанализирован в целом ряде работ, в том числе в [7]). Для обратимых процессов из принципа Лешателье следует $(\partial\lambda/\partial H)_\sigma \approx \mu_o(\partial M/\partial\sigma)_H$. Для отдельного кристаллита равновесное направление намагниченности насыщения M_s и, соответственно, проекции M_s на направление H и σ_0 – $M = M_s \cos\theta$ (θ – угол между M_s и H) находится из условия минимума полной энергии ферромагнетика, состоящей из суммы энергии магнитокристаллической анизотропии F_k , магнитной F_H и магнитоупругой F_σ энергий [1]:

$$F_k = \frac{1}{8}K(1 - \cos 4\phi); \quad (2)$$

$$F_H = -\mu_o H M_s \cos\theta; \quad (3)$$

$$F_\sigma = -\frac{3}{2}\lambda_s \sigma_o \cos^2 \theta, \quad (4)$$

где K – константа анизотропии; ϕ – угол между M_s и легкой осью.

Вильямсом и Бозортом с учетом случайного распределения направлений легкого намагничивания по отношению к направлению поля и приложенного напряжения получено следующее выражение параметра d кубического поликристаллического ферромагнетика [1]:

$$d \sim \frac{\lambda_s \mu_o M_s}{K} \frac{M}{M_s} \left(1 - \frac{M^2}{M_s^2} \right). \quad (5)$$

Как следует из (5), параметр d , определяющий эффективность ЭМАП в поле, соответствующем $M \approx 0,58M_s$ имеет максимальное значение, а при $M \rightarrow 0$ и $M \rightarrow M_s$ обращается в нуль.

Теперь рассмотрим зависимость d от приложенных напряжений. Введем обозначение $\eta = M/M_s$. Увеличение приложенного напряжения на $\Delta\sigma$ приводит к изменению θ и, как следствие, параметров η и d . Приращения этих параметров по отношению к равновесным значениям d_o и η_o обозначим Δd и $\Delta\eta$, причем, будем полагать, что $d_o \gg \Delta d$, $\eta_o \gg \Delta\eta$. Из выражения (5) с учетом введенных обозначений следует:

$$d = d_o + \Delta d \sim \eta(1 - \eta^2) = (\eta_o + \Delta\eta) \left[1 - (\eta_o + \Delta\eta)^2 \right]. \quad (6)$$

Знак приращения $\Delta\eta$ под действием приложенных напряжений нетрудно определить из анализа выражений для магнитной (3) и магнитоупругой (4) энергий. При условии $\lambda_s \sigma_o > 0$ действие напряжения эквивалентно приложению добавочного магнитного поля, что способствует дополнительному вращению векторов M_s в направлении H и σ_o , то есть к увеличению $M = M_s \cos\theta$. Такая ситуация соответствует растяжению ферромагнетика с положительной магнитострикцией. В случае, когда $\lambda_s \sigma_o < 0$, упругое растяжение приводит к вращению M_s в обратном направлении и к уменьшению M , что эквивалентно уменьшению эффективного поля.

В области слабых полей $\eta \ll 1$. Это дает простое соотношение для приращения магнитоупругой постоянной при нагружении

$$\Delta d \sim \Delta\eta \sim \lambda_s \Delta\sigma. \quad (7)$$

Выражение (7) показывает, что в слабых полях упругое растяжение в материале с $\lambda_s > 0$ (пермендюр) должно привести к увеличению параметра d , а в материале с $\lambda_s < 0$ (никель) к его уменьшению. Экспериментальные зависимости для никеля качественно совпадают с прогнозируемыми (см. рис. 4, кривая 1, рис. 3, кривые 1, 4), в то время как для пермендюра можно говорить лишь о тенденции увеличения ЭДС двойного ЭМАП при растяжении (см. рис. 2, рис. 4, кривая 1).

Для значений η , сопоставимых с единицей (сильные поля), из (6) несложно получить соотношение

$$\Delta d \sim \Delta\eta(1 - 3\eta_o^2). \quad (8)$$

Из выражения (8), в свою очередь, следует, что при условии $3\eta_o^2 > 1$ ($M > 0,58M_s$) знак приращения магнитоупругой постоянной меняется на противоположный (по сравнению со слабыми полями):

$$\Delta d \sim -\Delta\eta \sim -\lambda_s \Delta\sigma. \quad (9)$$

Это означает, что упругое растяжение в сильных полях при $\lambda_s < 0$ (никель) должно привести к увеличению параметра d , а при $\lambda_s > 0$ (пермендюр) – к его уменьшению, что хорошо согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 1-4).

Подобным образом можно объяснить и смещение максимума сигнала ЭМАП по полю. Как уже говорилось выше, в случае $\lambda_s \sigma_o > 0$ влияние растяжения эквивалентно приложению добавочного поля в том же направлении, что и внешнее поле. Поэтому магнитное состояние $M \approx 0,58M_s$, соответствующее максимуму d , достигается при меньших значениях внешнего поля (пермендюр, см. рис. 2). Обратная зависимость наблюдается в случае $\lambda_s \sigma_o < 0$. Поскольку упругое растяжение противодействует повороту намагниченности вдоль H и σ_o , для достижения максимума сигнала ЭМАП необходимо увеличить внешнее поле (никель, см. рис. 1).

Таким образом, выражение (5), полученное при допущении, что намагничивание осуществляется только за счет процессов вращения, дает хорошее качественное объяснение экспериментальных зависимостей в области полей, превышающих H_{\max} . В слабых полях, где преобладают процессы смещения, совпадение экспериментальных данных с выводами, следующими из анализа выражения (5), наблюдается не во всех случаях. Так, увеличение E при растяжении в области $H < H_{\max}$ в пермендюре выражено слабо, а в сплавах Fe-Ni оно вообще не проявляется. Причина расхождения в том, что в формировании сигнала ЭМАП участвуют не только магнитоупругие, но и магнитные характеристики ферромагнетика, изменяющиеся под действием поля и напряжений. Рассмотрим их подробнее.

Из входящих в выражение (1) магнитных восприимчивостей основную роль играет дифференциальная восприимчивость χ_d . На наиболее крутом участке кривой намагничивания, где χ_d имеет максимум, обратимая восприимчивость χ_r изменяется незначительно, к тому же по порядку величины она существенно меньше, чем χ_d [1]. Поскольку $E \sim 1/\chi_d^2$ (см. формулу (1)), ее влияние в отсутствии напряжений проявляется в ослаблении сигнала ЭМАП в слабых полях и в существенном сдвиге максимума сигнала (относительно максимума d) в область больших индукции. По данным работы [7], максимум сигнала ЭМАП объемных волн в никеле и армо-железе наблюдается при индукциях $B \approx 0,8 - 0,9 B_s$.

Рассмотрим влияние χ_d на упругие напряжения. В работе [1] на примере 68 – пермаллоя и никеля показано, что растяжение ферромагнетиков с положительной магнитоупругостью приводит к значительному увеличению угла наклона начального участка кривой намагничивания (к увеличению χ_d), а растяжение ферромагнетиков с отрицательной магнитоупругостью – к уменьшению χ_d . Следовательно, в соответствии с (1) рост χ_d должен в какой-то степени компенсировать увеличение $\partial\lambda/\partial H$ при $\lambda_s\sigma_o > 0$ и усиливать эффект от уменьшения $\partial\lambda/\partial H$ при $\lambda_s\sigma_o < 0$. Действительно, измерения показали, что в области $H < H_{\max}$ в никеле наблюдается четко выраженное уменьшение ЭДС двойного ЭМАП, в то время как в пермендюре ожидаемое увеличение E , следующее из анализа поведения d , проявляется слабо. В области процессов вращения χ_d резко снижается до уровня сравнимого с величиной χ_r , поэтому поведение сигнала ЭМАП адекватно описывается магнитоупругой постоянной d .

Сопоставление результатов, полученных на образцах в состоянии поставки и на образцах, подвергнутых отжигу, позволяет выяснить основные закономерности влияния внутренних напряжений на эффективность ЭМАП и на характер ее изменения при

упругом растяжении. Зависимости относительного изменения ЭДС двойного ЭМАП от σ_o в никеле и до и после отжига приведены на рис. 3 и 4. Полевые зависимости $E(H)$ в никеле для этих ситуаций приведены на рис. 5.

Это влияние не зависит от знака λ_s и сводится к тому, что внутренние напряжения создают добавочное поле анизотропии (энергия которого оценивается порядком величины $\lambda_s \sigma_i$ [1]), препятствующее перемагничиванию ферромагнетика в направлении внешнего поля. Амплитуда сигнала двойного ЭМАП после отжига возрастает в обоих случаях почти в 3 раза (эффективность прямого и обратного ЭМАП возрастает в $\sqrt{3}$ раз), а максимум сигнала смещается в область слабых полей. Эти данные согласуются с ранее полученными экспериментальными результатами по влиянию внутренних напряжений, возникающих при закалке и последующем отпуске сталей, на параметры ЭМАП [4, 8]. В этих работах показано, что ЭДС двойного ЭМАП обратно пропорциональна внутренним напряжениям ($E \sim 1/\sigma_i$). Смещение полевого максимума происходит в соответствии с выражением $H_{\max} \sim \lambda_s \sigma_i / M_s$, полученным в работе [8].

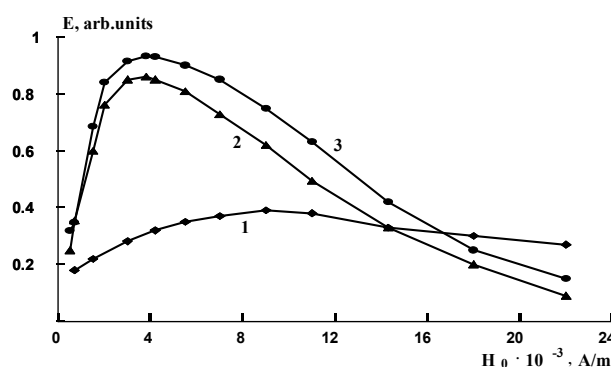


Рис. 5. Полевые зависимости ЭДС двойного ЭМАП в никеле в состоянии поставки (1) и после отжига (2, 3): 1, 2 – 0; 3 – 17 МПа

Как видно из рис. 3 и 4, чувствительность эффективности ЭМАП к упругому растяжению $\Delta E(\sigma_o)/\Delta\sigma_o$ в исходном состоянии существенно меньше, чем после отжига. Снижение чувствительности также связано с тем, что внутренние напряжения увеличивают «магнитную жесткость» (эффективную константу анизотропии), и поворот M_s на угол $\Delta\theta$ требует приложения больших напряжений.

После отжига тенденции изменения ЭДС двойного ЭМАП от σ_o в никеле и в слабых, и в сильных полях сохраняются (см. рис. 3), а в пермендюре область увеличения E при растяжении в полях $H < H_{\max}$ практически исчезает (см. рис. 4). Мы объясняем это преобладающим вкладом дифференциальной восприимчивости в ЭДС двойного ЭМАП (см. формулу (1)), которая в результате отжига существенно увеличивается.

Таким образом, получены экспериментальные данные, демонстрирующие влияние упругого растяжения на эффективность ЭМАП в модельных образцах поликристаллических ферромагнетиков с различным знаком магнитострикции насыщения в зависимости от их магнитного состояния при наличии и отсутствии внутренних напряжений и дано качественное описание полученных зависимостей на основе феноменологической модели ЭМАП.

Работа проведена при поддержке РФФИ-Урал (грант 07-08-96042).

Список литературы

1. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М.: ИЛ, 1956. 784 с.
2. Thompson R.B. Strain Dependence of Electromagnetic Generation Ultrasonic Surface Waves in Ferrous Metals // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 28. №9. P. 483-485.
3. Кулеев В.Г., Кононов П.С., Телегина И.А. Влияние растягивающих нагрузок на электромагнитно-акустическое преобразование в никеле // Дефектоскопия. 1980. № 4. С. 39-49.
4. Комаров В.А. Квазистационарное электромагнитно-акустическое преобразование в металлах. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. 235 с.
5. Комаров В.А., Ильясов Р.С., Шакшин Н.И. Исследование закономерностей возбуждения объемных акустических волн в ферромагнетиках квазистационарным электромагнитным полем // Дефектоскопия. 1983. № 4. С. 83-92.
6. Комаров В.А., Ильясов Р.С., Шакшин Н.И. Преобразование волн Лэмба нулевых мод в электромагнитное поле в ферромагнитных металлах // Дефектоскопия. 1982. №12. С. 38-45.
7. Ильясов Р.С., Комаров В.А. Электромагнитно-акустическое преоб-

зование объемных волн в ферромагнетиках накладными преобразователями. I. Экспериментальное изучение основных закономерностей // Дефектоскопия. 1983. № 11. С. 53-60.

8. Ильясов Р.С., Величко В.В., Бабкин С.Э. Особенности электромагнитно-акустического преобразования в стали 30ХГСА, подвергнутой термической обработке // Дефектоскопия. 2001. № 9. С. 34-45.
9. Белов К.П. Упругие, тепловые и электрические явления в ферромагнитных металлах. М.: Наука, 1957. 256 с.

Bibliography

1. Bozorth R. Ferromagnetism. M.: 1956. 784 p.
2. Thompson R.B. Strain Dependence of Electromagnetic Generation Ultrasonic Surface Waves in Ferrous Metals // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 28. №9. p. 483-485.
3. Kuleev V.G., Kononov P.S., Telegina I.A. The influence of tensile stress on the electromagnetic-acoustic transformation in nickel // Defektoskopia 1980. №4. p. 39-49.
4. Komarov V.A. Quasi-stationary electromagnetic-acoustic transformation in metals // Sverdlovsk: USC AS USSR, 1986. 235 p.
5. Komarov V.A., Ilyasov R.S., Shakshin N.I. Investigation of the laws of the excitation of bulk acoustic waves in ferromagnetic quasi-stationary electromagnetic field // Defektoskopia 1983. № 4. p. 83-92.
6. Komarov V.A., Ilyasov R.S., Shakshin N.I. The transformation of zero modes of Lamb waves in the electromagnetic field in ferromagnetic metals // Defektoskopia 1982. № 12. p. 38-45.
7. Ilyasov R.S., Komarov V.A. Electromagnetic-acoustic transformation of body waves in ferromagnets patch transducers. Experimental study of the basic laws // Defektoskopia 1983. № 11. z. 53-60.
8. Ilyasov R.S., Velichko V.V., Babkin S.E. Peculiarities of electromagnetic-acoustic transformation in the steel 30XGCA subjected to heat treatment // Defektoskopia 2001. № 9. p. 34-45.
9. Belov K.P. Elastic, thermal and electrical phenomena in ferromagnetic metals. Moscow: Nauka, 1957. 256 p.

УДК 669.58:621.198

Стеблянко В.Л., Пономарев А.П.

УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЕГО СТРУКТУРЫ ПРИ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТНОЙ ОБРАБОТКЕ ПОВЕРХНОСТИ

В работе представлены результаты сравнительного анализа основных эксплуатационных свойств металлоизделий с защитными цинковыми покрытиями, полученными различными способами. Показано преимущество плазменно-электролитного цинкования перед традиционными способами по качеству формируемого покрытия и обеспечиваемым им свойствам металлопродукции (коррозионным, пластическим и др.). Приведены результаты исследования структур покрытий.

Ключевые слова: плазменно-электролитная обработка, электроразрядная плазма, горячее цинкование, гальваническое цинкование, поверхностная плотность, адгезия покрытия, временное сопротивление, относительное удлинение после разрыва, скорость коррозии, дифференциальная сканирующая калориметрия.

The paper presents the results of comparative analysis of the basic metal goods service properties with protective zinc coatings formed by different methods. It is shown the advantage of plasma-electrolytic zinking over traditional methods in quality of the formed coating and metal products properties provided by it (corrosive, plastic, etc). It is given the results of coatings structures research.

Keywords: plasma-electrolytic treatment, electric discharge plasma, hot-dip galvanizing, electrolytic zinking, surface density, adhesion of coating, ultimate strength, percent elongation after rupture, corrosion rate, differential scanning calorimetry.

Повышение срока службы металлопродукции и сокращение потерь металла от коррозии является одной из ключевых задач современной промышленности. Значительную роль в решении этой задачи играют защитные покрытия, применение которых позволяет повысить долговечность металлических изделий. По объёму и номенклатуре защищаемой продукции ведущее место среди металлических покрытий занимают цинковые. Причинами их широкого использо-

вания являются надёжность и эффективность защиты, невысокая стоимость, относительная простота нанесения. В последние годы в России отмечается устойчивый рост производства и потребления металлоизделий с цинковым покрытием (рис. 1) [1]. В 2009 году наблюдался некоторый спад, вызванный мировым финансовым кризисом. Но уже в следующем году докризисный уровень потребления был превышен, и рост продолжился.