

Исследование структуры и свойств

Физические методы исследования и контроля

УДК 620.179.14

ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТАЛЕЙ ОТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ЧАСТОТЫ

© В. А. Сандовский¹

Статья поступила 25 сентября 2015 г.

Метод измерений магнитной проницаемости материалов в переменных электромагнитных полях использован для исследований свойств различных сталей. Показано, что магнитная проницаемость зависит от частоты и химического состава (марки) стали, а также от структуры исследуемого материала. В экспериментах исследованы образцы конструкционных сталей в состоянии поставки. Результаты представлены на комплексной плоскости в виде графиков зависимости измеряемых значений от возбуждающей частоты. Приведены методика измерений и схема экспериментальной установки.

Ключевые слова: магнитное поле; удельная электрическая проводимость; вихревые токи; поверхностный эффект; марки стали; доменная структура.

Современные исследования в области магнитных явлений позволяют не только углублять знания в области общей теории твердого тела, но также способствуют повышению технического уровня производства. В заводских лабораториях наряду с механическими испытаниями материалов применяют магнитные, электромагнитные и вихревые методы [1 – 4].

В работах [5 – 7] описаны магнитные явления, происходящие в ферромагнетиках при намагничивании постоянным или переменным низкочастотным полем (частота $f < 5$ Гц).

С увеличением частоты намагничивающего поля растет влияние вихревых токов, которое легко проследить по искажениям петель магнитного гистерезиса [8]. С целью его уменьшения при передаче высокочастотных сигналов используют трансформаторы с магнитопроводами в виде колец, намотанных тонкой пермаллоевой лентой [8], ферритовых колец или сердечников. Также развивается поверхностный эффект, при котором электромагнитное поле вытесняется на поверхность образца. Увеличение частоты, кроме того, приводит к уменьшению размеров доменов, что в свою очередь сказывается на зависимости магнитных свойств исследуемого образца от частоты.

Если намагничивающее поле достаточно велико, то исследование процессов намагничивания существенно усложняется, так как проявляется нелинейная зависимость индукции от величины намагничивающего поля (петля магнитного гистерезиса) [8]. Поэтому амплитуду намагничивающего поля целесообразно ограничить, поскольку в малых намагничивающих полях (релеевская область) индукционную зависимость в расчетах приближенно можно считать линейной.

Цель работы — экспериментальное исследование частотной зависимости (в диапазоне средних частот 30 – 94 кГц) процессов намагничивания стальных материалов переменным полем ограниченной амплитуды.

Магнитные свойства материалов исследовали электромагнитным способом. Над поверхностью образца располагали источник электромагнитного поля и измерительный элемент. Привносимые образцом изменения поля измеряли.

Структурная схема измерительной установки (рис. 1, а), выполненная по дифференциальному принципу, включала два одинаковых накладных преобразователя. Преобразователь, состоящий из катушек 1 и 3, использовали в качестве компенсационного и не располагали вблизи образца. Другой (катушки 2 и 4), при измерениях устанавливаемый на поверхность ис-

¹ Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия.

следуемого образца 11, преобразовывал информацию о его свойствах в электрический сигнал (диаметр токовой катушки — 9 мм). Катушки 1 и 2 соединяли согласно, а 3 и 4 — встречно, что позволяло вычитать из сигнала катушки 4 часть напряжения, соответствующего ее сигналу в отсутствие образца.

Для питания системы использовали генератор 6. Резистор 5 служил для формирования опорного напряжения, вольтметр 7 — для измерения амплитуды напряжения U_2 на выходе мостовой схемы при установленном на поверхность образца преобразователе. Фазометром 8 измеряли фазу этого напряжения, вольтметром 9 — амплитуду напряжения U_1 измерительной катушки в отсутствие образца, частотомером 10 — частоты генератора 6.

Напряженность магнитного поля при измерениях не превышала 0,3 А/см. При этом перемагничивание образцов происходило в релейской области, т.е. возможность уменьшения влияния нелинейности изменений магнитной индукции была реализована. В установке использовали стандартную аппаратуру: генератор Г3-33, частотомер Ч3-33, цифровой вольтметр В7-65/2, цифровой фазометр Ф2-34. Погрешности вольтметра и фазометра не превышали 1,5 % и 0,6 градуса соответственно.

Вихретоковый преобразователь накладного типа (см. рис. 1, б) состоит из двух concentрических катушек, расположенных над поверхностью исследуемого образца. Одна катушка (радиусом R) подключается к генератору переменного синусоидального напряжения. При протекании в ней тока создается электромагнитное поле соответствующей частоты. Другая (радиусом r) служит в качестве измерительной.

Для измерений магнитной проницаемости использовали относительный сигнал $U_{отн}$ — отношение сигналов U_2 на выходе схемы при установленном на поверхность образца преобразователе и U_1 измерительной катушки в отсутствие образца. Заметим, что $U_{отн}$ характеризуется как по амплитуде, так и по фазе. Таким образом, имеем

$$U_{отн} = U_2/U_1. \quad (1)$$

Для определения магнитных свойств материалов необходимо от электрических сигналов перейти к магнитным характеристикам. Для этого воспользовались известной моделью — решением задачи о витке с током, расположенном над проводящим магнитным полупространством [9 – 11].

Однако чтобы ее корректно использовать, катушки накладных преобразователей должны рассматриваться как concentрические витки. Но поскольку в измерительной установке катушки наматывали тонким проводом с таким расчетом, чтобы размер сечения намотки был значительно меньше радиусов катушек, применение модели можно считать вполне правомерным.

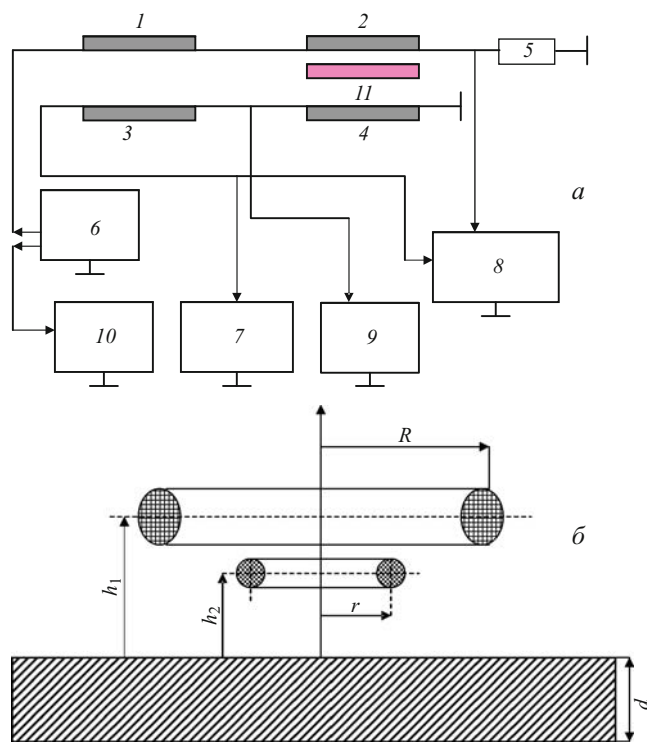


Рис. 1. Структурные схемы измерительной установки (а) и накладного вихретокового преобразователя над поверхностью образца (б)

Согласно математической модели сигнал, вносимый в измерительный виток исследуемым образцом, может быть рассчитан по следующим формулам [11]:

$$Z_2 = j\omega\mu_0\pi r \int_0^\infty J_1(\delta x) J_1(x) \exp(-\alpha x) F(x) dx; \quad (2)$$

$$F(x) = \frac{\mu x - \sqrt{x^2 + j\beta^2}}{\mu x + \sqrt{x^2 + j\beta^2}}; \quad (3)$$

$$\beta = R\sqrt{\omega\mu_0\sigma}; \quad (4)$$

$$j = \sqrt{-1}; \beta = 2\pi f; \delta = r/R; \alpha = \frac{h_1 + h_2}{R}, \quad (5)$$

где J_1 — функции Бесселя первого рода первого порядка; μ — магнитная проницаемость; μ_0 — магнитная постоянная; σ — удельная электрическая проводимость материала образца; f — частота тока, протекающего по внешнему витку; h_1 и h_2 — расстояния витков от поверхности образца.

Сигнал на измерительном витке в отсутствие образца можно рассчитать по формуле [11]

$$Z_1 = \frac{\omega\mu_0\pi r}{\pi\sqrt{\delta}} \frac{1}{k} [(2-k^2)K - 2E], \quad (6)$$

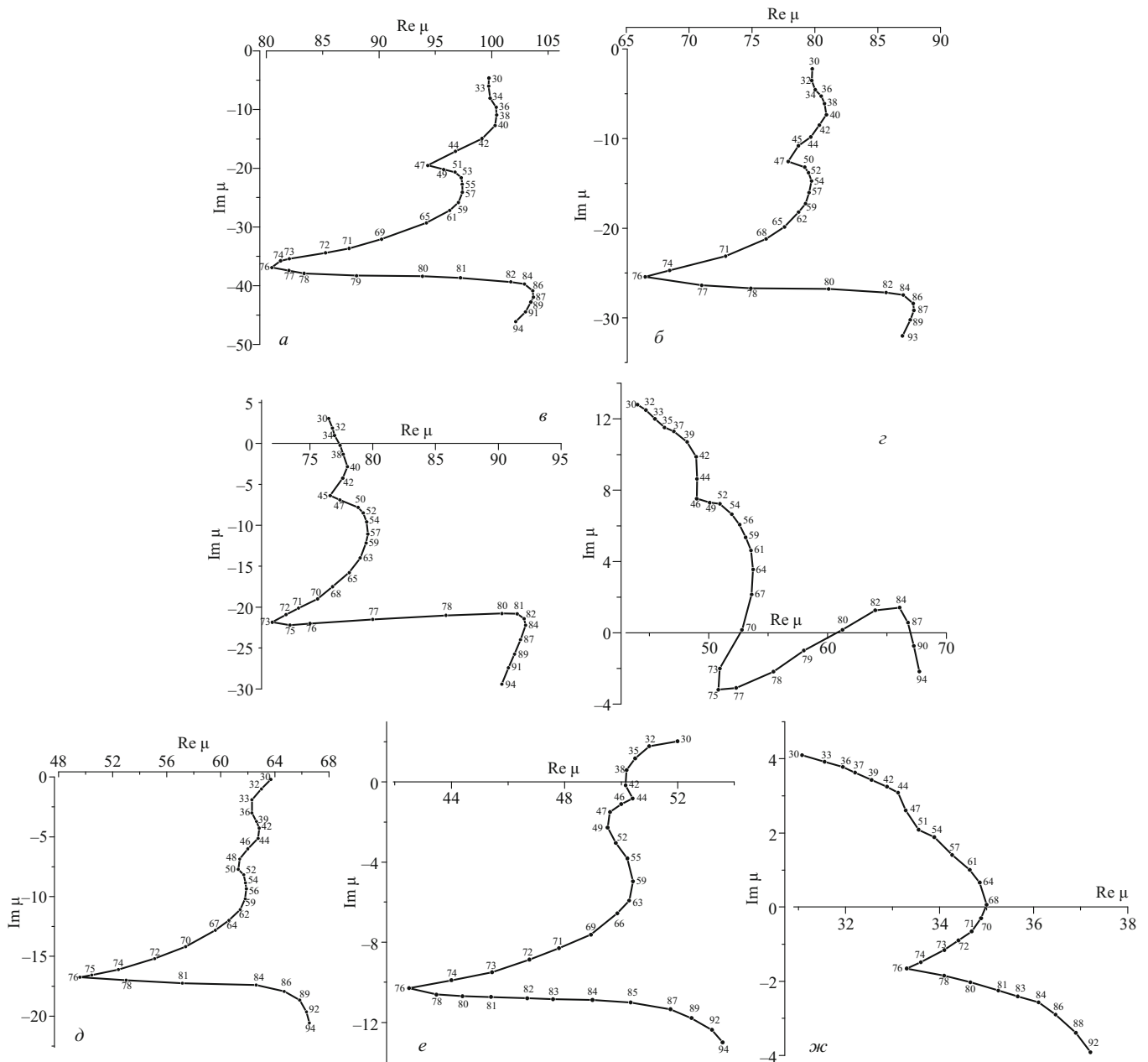


Рис. 2. Частотные зависимости магнитной проницаемости образцов сталей: Ст3 (а), Ст20 (б), 12ХНЗ (в), 18ХГТ (г), Ст45 (д), У8 (е), 40Х (ж)

где K и E — полные эллиптические интегралы от параметра

$$k = 2 \sqrt{\frac{\delta}{(1+\delta)^2 + \alpha_1^2}}, \quad \alpha_1 = \frac{|h_1 - h_2|}{R}. \quad (7)$$

Так как в измерительной установке использовали относительный сигнал $U_{\text{отн}}$ (искомый сигнал, нормированный к сигналу измерительного витка в отсутствие образца), то рассчитывали его следующим образом:

$$U_{\text{отн}} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{j}{S_0} \int_0^{\infty} J_1(\delta x) J_1(x) \exp(-\alpha x) F(x) dx, \quad (8)$$

где

$$S_0 = \frac{1}{\pi k \sqrt{\delta}} [(2-k^2)K - 2E]. \quad (9)$$

Далее из сопоставления экспериментально измеренного относительного сигнала с его теоретическим значением, рассчитанным по (8), (9), можно определить параметр μ .

В общем случае магнитная проницаемость в переменных полях — комплексная величина [13]

$$\mu = \mu_1 - j\mu_2, \quad (10)$$

где μ_1 и μ_2 — вещественная и мнимая ее части.

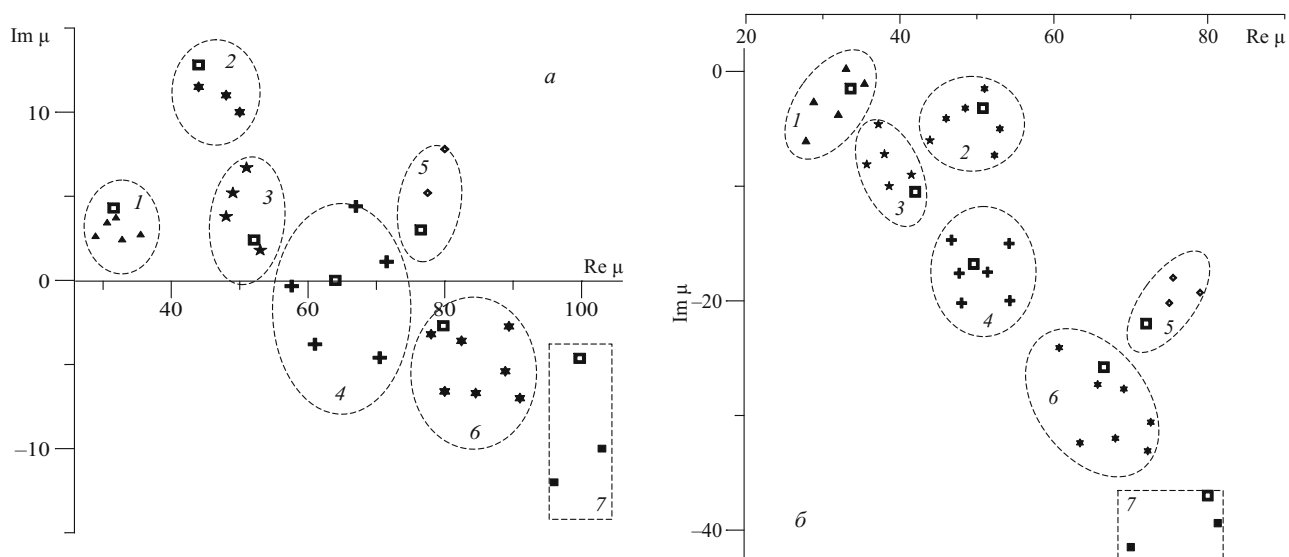


Рис. 3. Распределение результатов измерений магнитной проницаемости сталей по зонам для частот 30 (а) и 76 кГц (б): 1 — 40X; 2 — 18ХГТ; 3 — У8; 4 — Ст35 и Ст45; 5 — 12ХН3; 6 — Ст20; 7 — Ст3

Для определения μ_1 и μ_2 составляли систему уравнений, в которой слева — рассчитанные по (8), (9) величины относительного сигнала, а справа — соответствующие им измеренные экспериментально значения:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} U_{\text{отн}} = U \cos \gamma \\ \operatorname{Im} U_{\text{отн}} = U \sin \gamma, \end{cases} \quad (11)$$

где $U = U_2/U_1$ (U_1 и U_2 — напряжения на измерительной катушке в отсутствие образца и измеряемое вольтметром на катушках преобразователя, установленного на поверхность образца); γ — показания фазометра.

Систему уравнений (11) решали с использованием процедуры минимизации функционала по методу деформируемого многогранника Нелдера – Мида [12], в результате определяли искомые μ_1 и μ_2 . Функционал имел следующий вид:

$$\Phi = |\operatorname{Re} U_{\text{отн}} - U \cos \gamma| + |\operatorname{Im} U_{\text{отн}} - U \sin \gamma|.$$

На рис. 2 показаны зависимости магнитной проницаемости стальных образцов от частоты (указана на кривых) в диапазоне 30 – 94 кГц.

Сталь Ст3 содержит наименьшее количество примесей (см. таблицу). Видно (см. рис. 2, а), что вещест-

венная часть μ уменьшается с увеличением частоты (вплоть до частоты 76 кГц), а мнимая — только растет. Аналогичен ход кривой для стали Ст20 (см. рис. 2, б). В ней содержание углерода несколько больше. В стали 12ХН3 (см. рис. 2, в) содержание хрома и особенно никеля существенно увеличено (см. таблицу). По сравнению с Ст3 и Ст20 кривая частоты (30 – 72 кГц) сдвинута ближе к оси $\operatorname{Im} \mu$. Увеличение содержания хрома и марганца (образец стали 18ХГТ, см. таблицу) приводит к еще большему сдвигу этой части графика к оси ординат (см. рис. 2, г), а также к существенному росту $\operatorname{Im} \mu$. Повышение содержания углерода (Ст45) уменьшает магнитную проницаемость (см. рис. 2, д).

Ход кривой для инструментальной стали У8 (см. рис. 2, а) аналогичен Ст45. Сталь 40X (см. рис. 2, ж) при среднем уровне содержания углерода включает достаточно большое количество хрома (см. таблицу), поэтому экстремум на кривой частотной зависимости выражен слабее, чем на кривых для других образцов.

Полученные данные показывают: кривые (см. рис. 2) имеют выраженный экстремум в области 74 – 78 кГц. Это связано с тем, что основа изучаемых сплавов одна — железо. Увеличение количества легирующих элементов в сталях уменьшает этот экстремум.

Содержание химических элементов в сталях, % масс.

Марка стали	С	Мn	Cr	Ni
Ст3	0,14 – 0,22	0,3 – 0,6	Не более 0,3	Не более 0,3
Ст20	0,17 – 0,24	0,35 – 0,65	Не более 0,25	Не более 0,25
12ХН3	0,09 – 0,16	0,3 – 0,6	0,6 – 0,9	2,75 – 3,15
18ХГТ	0,17 – 0,23	0,8 – 1,10	1,0 – 1,30	Не более 0,30
Ст35	0,32 – 0,40	0,5 – 0,8	Не более 0,25	Не более 0,25
Ст45	0,42 – 0,50	0,5 – 0,8	Не более 0,25	Не более 0,25
У8	0,76 – 0,83	0,17 – 0,33	—	—
40X	0,36 – 0,44	0,50 – 0,80	0,8 – 1,10	Не более 0,30

Исследуемые образцы находились в состоянии поставки, т.е. не подвергались ни термической, ни механической обработке. А это означает, что для них характерна ферритная структура, которая определяет и соответствующую доменную структуру. Очевидно, что изменение структуры повлияет на магнитную проницаемость. Действительно, для закаленных сталей рассматриваемый экстремум существенно меньше. Это объясняется тем, что при закалке образуется твердый пересыщенный раствор углерода в железе [14], а изначально существующая ферритная фаза переходит в мартенситную структуру. При этом магнитная проницаемость материала уменьшается. В случае чистого железа с достаточно однородной доменной структурой экстремум, наоборот, усиливается (у ферритового стержня, имеющего измельченную структуру, можно наблюдать даже эффект резонансного поглощения на частоте 76 кГц [15]).

Итак, составляющие магнитной проницаемости зависят от химического состава образцов, их доменной структуры (термической обработки).

На рис. 3 представлены распределения результатов измерений магнитной проницаемости образцов, сгруппированные по зонам, для частот 30 и 76 кГц.

Выделенные зоны соответствуют маркам стали. Так, зона 7 включает данные по образцам стали Ст3, содержащей наименьшее количество примесей. В зоне 6 собраны значения измерений по образцам стали Ст20, в которой содержание углерода выше, в зоне 5 — стали 12ХН3, содержащей хром и большое количество никеля, в зоне 4 — сталей Ст35 и Ст45, имеющих повышенное содержание углерода, в зоне 3 — инструментальной стали У8, в которой уровень содержания углерода еще выше. Сталь 18ХГТ (зона 2) характеризуется увеличенным содержанием хрома и марганца. И, наконец, зона 1 содержит результаты по стали 40Х, включающей большое количество углерода, хрома и марганца. Видно, что составляющие магнитной проницаемости уменьшаются по мере увеличения легирующих элементов в сталях.

Таким образом, предлагаемый метод определения магнитной проницаемости, включающий измерение электрических параметров и последующий расчет, показал связь результатов измерений с химическим составом сталей. Отмечено уменьшение магнитной проницаемости с увеличением содержания легирующих элементов в образце. Обработкой полученных данных (для одной из частот исследуемого диапазона) установлена возможность определения марки стали с использованием накладного преобразователя. Такой подход в отличие от химического анализа — неразрушающий и неповреждающий, поэтому с успехом может применяться для разбраковки деталей в заводских условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бидя Г. В., Ничипурук А. П.** Магнитные свойства термообработанных сталей. — Екатеринбург: ИМФ УрО РАН, 2005. — 218 с.
2. **Сандовский В. А.** Обработка многомерного сигнала при магнитном спектрометрическом контроле сталей / Дефектоскопия. 1982. № 4. С. 33 – 36.
3. **Сандовский В. А.** Контроль качества изотермической закалки сталей / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 11. С. 32 – 36.
4. **Сандовский В. А.** Метод оценки магнитной вязкости ферромагнитных материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. Т. 75. № 10. С. 36 – 40.
5. **Бозорт Р.** Ферромагнетизм / Пер. с англ. — М.: Иностранная литература, 1956. — 304 с.
6. **Вонсовский С. В.** Магнетизм. — М.: Наука, 1971. — 1032 с.
7. **Вонсовский С. В., Шур Я. С.** Ферромагнетизм. — М. – Л.: ОГИЗ, 1948. — 816 с.
8. **Кадочников А. И.** Динамические петли магнитного гистерезиса. — Екатеринбург: ИМФ УрО РАН, 2007. — 287 с.
9. **Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М.** Основные дифференциальные уравнения математической физики. — М.: Физматгиз, 1962. — 767 с.
10. **Гринберг Г. А.** Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. — М. – Л.: АН СССР, 1948. — 647 с.
11. **Дякин В. В., Сандовский В. А.** Задачи электродинамики в неразрушающем контроле. — Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2008. — 390 с.
12. **Левит М. Г.** Программное обеспечение для решения задач численного анализа на СМ ЭВМ. — Кишинев: Штиинца, 1991. — 237 с.
13. **Кадочников А. И.** Теория слабого поверхностного эффекта, учитывающая магнитную вязкость с малым временем релаксации / ФММ. 1997. № 1. С. 48 – 58.
14. **Сагарадзе В. В., Уваров А. И.** Упрочнение и свойства аустенитных сталей. — Екатеринбург: ИФМ УрО РАН, 2013. — 719 с.
15. **Сандовский В. А.** Исследования резонансных явлений в ферритовых образцах / Электричество. 2013. № 9. С. 56 – 61.

REFERENCES

1. **Bida G. V., Nichipuruk A. P.** Magnitnye svoystva termoobrabotannykh staley [Magnetic properties of thermo-treated steels]. — Yekaterinburg: Izd. IMF UrO RAN, 2005. — 218 p. [in Russian].
2. **Sandovskii V. A.** Obrabotka mnogomernogo signala pri magnitnom spektrometricheskom kontrole staley [Monitoring of multi-dimensional signal at specter-metric testing of steels] / Defektoskopiya. 1982. N 4. P. 33 – 36 [in Russian].
3. **Sandovskii V. A.** Kontrol' kachestva izotermicheskoi zakalki staley [Quality Control of Isothermal Hardening of Steels] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2012. Vol. 78. N 11. P. 32 – 36 [in Russian].
4. **Sandovskii V. A.** Metod otsenki magnitnoi vyazkosti ferromagnitnykh materialov [Assessment of magnetic viscosity of ferromagnetic materials] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2009. Vol. 75. N 10. P. 36 – 40 [in Russian].
5. **Bozort R.** Ferromagnetizm [Ferromagnetism]. — Moscow: Inostrannaya literatura, 1956. — 304 p. [Russian translation].
6. **Vonsovskii S. V.** Magnetizm [Magnetism]. — Moscow: Nauka, 1971. — 1032 p. [in Russian].
7. **Vonsovskii S. V., Shur Ya. S.** Ferromagnetizm [Ferromagnetism]. — Moscow – Leningrad: OGIZ, 1948. — 816 p. [in Russian].
8. **Kadochnikov A. I.** Dinamicheskie petli magnitnogo gisterezisa [Dynamic loops of magnetic hysteresis]. — Yekaterinburg: Izd. IMF UrO RAN, 2007. — 287 p. [in Russian].
9. **Koshlyakov N. S., Gliner É. B., Smirnov M. M.** Osnovnye differentsial'nye uravneniya matematicheskoi fiziki [Fundamental differential equation of mathematical physics]. — Moscow: Fizmatgiz, 1962. — 767 p. [in Russian].
10. **Grinberg G. A.** Izbrannyye voprosy matematicheskoi teorii élektricheskikh i magnitnykh yavlenii [The chosen problems of mathematical theory of electric and magnetic phenomena]. — Moscow – Leningrad: Izd. AN SSSR, 1948. — 647 p. [in Russian].
11. **Dyakin V. V., Sandovskii V. A.** Zadachi élektrodinamiki v nerazrushayushchem kontrole [The problems of electrodynamic in nondestructive testing]. — Yekaterinburg: Izd. IMF UrO RAN, 2008. — 390 p. [in Russian].

12. **Levit M. G.** Programmnoe obespechenie dlya resheniya zadach chislennogo analiza na SM ÉVM [The special programs for solution of problems of digital analysis with computers]. — Kishinev: Shtiintsa, 1991. — 237 p. [in Russian].
13. **Kadochnikov A. I.** Teoriya slabogo poverkhnostnogo éffekta, uchityvayushchaya magnitnuyu vyazkost' s malym vremenem relaksatsii [Weak surface effect theory that take into account magnetic viscosity with short interval in relaxations] / Fiz. Met. Metalloved. 1997. N 1. P. 48 – 58 [in Russian].
14. **Sagaradze V. V., Uvarov A. I.** Uprochnenie i svoistva austenitnykh stalei [Work-hardening and properties austenite steels]. — Yekaterinburg: Izd. IMF UrO RAN, 2013. — 719 p. [in Russian].
15. **Sandovskii V. A.** Issledovaniya rezonansnykh yavlenii v ferritovykh obraztsakh [Researches upon resonance phenomena in ferrite specimen] / Élektrichestvo. 2013. N 9. P. 56 – 60 [in Russian].