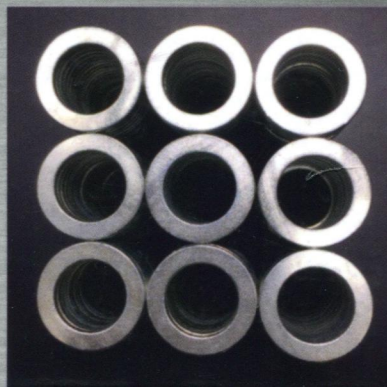


Ю. Н. Стародубцев

Физические
свойства
и применение
магнитомягких
материалов



Ю. Н. Стародубцев

**Физические
свойства
и применение
магнитомягких
материалов**

**Москва
Горячая линия – Телеком
2021**

УДК 621.318.13

ББК 32.843.5

C77

Рецензенты: доктор техн. наук, профессор *В. С. Цепелев*,
канд. физ.-мат. наук, доцент *В. А. Катаев*

Стародубцев Ю. Н.

C77 Физические свойства и применение магнитомягких материалов. –
М.: Горячая линия – Телеком, 2021. – 384 с.: ил.

ISBN 978-5-9912-0845-1.

Рассмотрены физические свойства магнитомягких материалов и их применение. Введены электромагнитные величины, которые используются для характеристики магнитомягких материалов, описаны технология производства и физические свойства электротехнической стали, прецизионных сплавов, ферритов, магнитодиэлектриков, аморфных и нанокристаллических материалов, приведены сведения о применении магнитомягких материалов в качестве элементов электрических цепей (катушки индуктивности, трансформаторы и магнитные модуляторы), а также в качестве датчиков и электромагнитных экранов.

Для специалистов в области электротехники, радиотехники, электроники, а также для специалистов других отраслей, в которых исследуют, производят и применяют магнитомягкие материалы.

ББК 32.843.5

Адрес издательства в Интернет WWW.TECHBOOK.RU

ISBN 978-5-9912-0845-1

© Ю. Н. Стародубцев, 2020, 2021
© НТИ «Горячая линия – Телеком», 2021

Оглавление

Предисловие	3
1. Электромагнитные величины	5
1.1. Электромагнитное поле	5
1.1.1. Уравнения Максвелла	5
1.1.2. Электромагнитные параметры вещества	7
1.1.3. Энергия электромагнитного поля	9
1.2. Электрические и магнитные цепи	10
1.2.1. Электрическая цепь	10
1.2.2. Электромагнитная индукция	13
1.2.3. Электрическая емкость	15
1.2.4. Индуктивность	16
1.2.5. Магнитная цепь	18
1.2.6. Катушка индуктивности	21
1.3. Магнитные вещества	22
1.3.1. Спонтанная намагниченность и точка Кюри	22
1.3.2. Магнитная анизотропия	26
1.3.3. Магнитострикция	27
1.3.4. Доменная структура	30
1.4. Намагничивание	32
1.4.1. Измерение магнитных величин	32
1.4.2. Кривая намагничивания	35
1.4.3. Процессы намагничивания	38
1.4.4. Аппроксимация кривой намагничивания	41
1.4.5. Кривая магнитострикции	43
1.5. Перемагничивание	44
1.5.1. Магнитный гистерезис	44
1.5.2. Петля магнитного гистерезиса	45
1.5.3. Аппроксимация петли магнитного гистерезиса	49
1.5.4. Коэрцитивная сила	52
1.6. Динамическое перемагничивание	53
1.6.1. Динамическая петля магнитного гистерезиса	53
1.6.2. Эллиптическая петля магнитного гистерезиса	56
1.6.3. Комплексная магнитная проницаемость	58
1.6.4. Динамическая кривая намагничивания	62

1.6.5. Магнитные потери	65
1.6.6. Магнитные потери в сложных условиях намагничивания	70
1.6.7. Сопротивление магнитных потерь	76
1.6.8. Тангенс угла потерь	77
1.6.9. Добротность	80
1.7. Магнитная стабильность	80
1.7.1. Магнитное последствие и дезаккомодация	80
1.7.2. Старение	85
1.7.3. Температура	87
1.7.4. Механические напряжения	90
1.8. Магнитопроводы	94
1.8.1. Замкнутые кольцевые магнитопроводы	94
1.8.2. Замкнутые прямоугольные магнитопроводы	96
1.8.3. Кольцевые магнитопроводы с разрезом	96
1.8.4. Коэффициент размагничивания	98
1.8.5. Коэффициент выпучивания	103
1.8.6. Ленточные магнитопроводы	103
1.8.7. Стержневые магнитопроводы	106
1.8.8. Кольцевые магнитопроводы в однородном магнитном поле	109
2. Магнитомягкие материалы	111
2.1. Краткая история разработки магнитомягких материалов	111
2.2. Общая характеристика	117
2.3. Электротехническая сталь	122
2.3.1. Анизотропная электротехническая сталь	126
2.3.2. Высокопроницаемая анизотропная электротехническая сталь	141
2.3.3. Анизотропная холоднокатаная электротехническая стальная лента	143
2.3.4. Изотропная электротехническая сталь	144
2.3.5. Высокремнистая электротехническая сталь	150
2.3.6. Электротехническая нелегированная тонколистовая сталь	152
2.3.7. Электротехническая нелегированная торговая сталь ..	153
2.4. Прецизионные сплавы	154
2.4.1. Сплавы железо — никель	154
2.4.2. Сплавы железо — кобальт	163
2.4.3. Сплавы железо — никель — кобальт	167

2.4.4. Сплавы железо — алюминий и железо — кремний — алюминий	172
2.5. Ферриты	177
2.5.1. Структура ферритов	177
2.5.2. Технология производства	179
2.5.3. Магнитомягкие ферриты	180
2.6. Магнитодиэлектрики	189
2.6.1. Магнитная проницаемость	190
2.6.2. Технология производства	191
2.6.3. Российские магнитодиэлектрики	192
2.6.4. Импортные магнитодиэлектрики	193
2.6.5. Компактированный порошковый материал	195
2.7. Аморфные материалы	196
2.7.1. Аморфное состояние	196
2.7.2. Технология быстрой закалки расплава	201
2.7.3. Поверхность аморфной ленты	209
2.7.4. Механические свойства	212
2.7.5. Магнитомеханические свойства	216
2.7.6. Кристаллизация	219
2.7.7. Сплавы на основе железа	221
2.7.8. Сплавы на основе кобальта	226
2.7.9. Аморфные сплавы ГАММАМЕТ	231
2.8. Нанокристаллические материалы	240
2.8.1. Магнитная анизотропия	240
2.8.2. Нанокристаллизация	244
2.8.3. Физические свойства	249
2.8.4. Нанокристаллические сплавы	253
2.8.5. Нанокристаллические сплавы ГАММАМЕТ	258
2.9. Магнитопроводы ГАММАМЕТ	262
2.9.1. Магнитопроводы в защитном контейнере	262
2.9.2. Композиционные магнитопроводы	266
2.9.3. Разрезные композиционные магнитопроводы	271
3. Электромагнитные компоненты и устройства	277
3.1. Индуктивные катушки	277
3.1.1. Включение индуктивной катушки под напряжение ...	279
3.1.2. Собственная емкость индуктивной катушки	282
3.1.3. Сглаживающие фильтры	284
3.1.4. Помехоподавляющие фильтры	287
3.1.5. Электрические реакторы	289
3.1.6. Помехоподавляющие насыщающиеся реакторы	298

3.2. Трансформаторы	299
3.2.1. Эквивалентная схема трансформатора	300
3.2.2. Силовые трансформаторы	302
3.2.3. Трансформаторы тока	305
3.2.4. Трансформаторы напряжения	306
3.2.5. Сигнальные трансформаторы	308
3.2.6. Импульсные трансформаторы	311
3.2.7. Дифференциальные трансформаторы	314
3.2.8. Дифференцирующие трансформаторы	317
3.2.9. Индукционные катушки	318
3.3. Магнитные модуляторы	320
3.3.1. Магнитомодуляционные преобразователи	322
3.3.2. Магнитные ключи	323
3.3.3. Магнитные усилители	323
3.3.4. Измерительные трансформаторы постоянного тока ...	328
3.4. Датчики	329
3.4.1. Индуктивные датчики	329
3.4.2. Индукционные датчики	330
3.4.3. Датчики Холла	331
3.4.4. Магниторезистивные датчики	332
3.4.5. Феррозонды	334
3.4.6. Магнитострикционные датчики	337
3.4.7. Магнитоупругие датчики	338
3.4.8. Антикращные датчики	339
3.4.9. Датчики Виганда	341
3.5. Экранирование	342
3.5.1. Магнитные экраны	344
3.5.2. Экранированные помещения	345
Краткая биографическая справка	346
Условные обозначения	350
Литература	361