

№ 508

**МИСиС**

---

А.С. Перминов  
Е.А. Шуваева  
В.Ю. Введенский

# **Методы испытаний магнитных материалов**

Лабораторный практикум

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 508

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ СТАЛИ и СПЛАВОВ**  
Технологический университет



Кафедра физического материаловедения

А.С. Перминов  
Е.А. Шуваева  
В.Ю. Введенский

# **Методы испытаний магнитных материалов**

Лабораторный практикум

*Под редакцией доктора физико-математических наук,  
профессора А.С. Лилеева*

Допущено учебно-методическим объединением  
по образованию в области металлургии в качестве  
учебного пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по направлению Физическое  
материаловедение и специальности  
Стандартизация и сертификация

Москва Издательство «УЧЕБА» 2006

УДК 006.91:537.6  
П26

Рецензент

*Н.В. Каретникова* (отд. информ. обслуживания УНУ МКиС)

**Перминов А.С., Шуваева Е.А., Введенский В.Ю.**

П26 Методы испытания магнитных материалов: Лаб. практикум. – М.: МИСиС, 2006. – 70 с.

Данный практикум содержит лабораторные работы, выполнение которых основано на использовании методов, наиболее применяемых при испытании магнитных материалов. В первой работе рассматривается метод определения магнитных свойств трансформаторной стали. Во второй – приготовление кольцевого образца магнитомягкого материала, испытание которого для определения статических характеристик рассмотрено в работе 3, а динамических – в работе 4. Пятая и шестая работы посвящены испытаниям магнитотвердых материалов на гистерезисграфе и вибромагнитометре.

Содержание практикума соответствует программе курса «Методы испытаний магнитных материалов».

Предназначен для студентов специальностей 150701, 150702, 200503, а также для студентов, обучающихся по направлению «Физика» магистерской подготовки, изучающих курсы «Физические методы исследования», «Магнитомягкие материалы», «Магнитотвердые материалы», «Магнитные материалы», «Методы испытаний магнитных материалов» и «Сертификационные испытания специальных материалов».

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
<i>Лабораторная работа № 1.</i> Испытания трансформаторных сталей .....	5
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Подготовка витого кольцевого образца из аморфной ленты к определению его магнитных свойств .....	19
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Испытание магнитомягких материалов баллистическим методом .....	31
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Испытание магнитомягких материалов для определения динамических магнитных свойств .....	41
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Проведение испытания для определения статических параметров магнитотвердого материала на гистерезисграфе .....	49
<i>Лабораторная работа № 6.</i> Испытание магнитотвердого материала на вибромагнитометре .....	57
Приложение А. Формулы и таблица со значениями распределения Стьюдента для статистической обработки экспериментальных данных .....	68

## **ВВЕДЕНИЕ**

С 1 июля 2003 года вступил в действие Федеральный закон № 183-ФЗ «О техническом регулировании», который регулирует отношения, возникающие при подтверждении соответствия – удостоверения соответствия продукции техническим регламентам, стандартам, условиям договоров. Важнейшим инструментом в деятельности по подтверждению соответствия являются испытания, которые проводят испытательные лаборатории, и от компетентности последних зависят достоверность информации и обоснованность принимаемых на её основе управляющих решений.

Испытания магнитных материалов с точки зрения базы нормативной документации являются одной из проблем – на данный момент в Российской Федерации действуют всего два стандарта на методики выполнения измерений параметров магнитных материалов: ГОСТ 8.377–80 «Государственная система обеспечения единства измерений. Материалы магнитомягкие. Методы определения статических магнитных характеристик» и ГОСТ 8.268–77 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик магнитотвердых материалов».

В данном практикуме рассматриваются наиболее применяемые методы определения параметров магнитных материалов – как стандартные, так и не стандартные.

Перед выполнением каждой лабораторной работы необходимо проверить на актуальность используемые нормативные документы на электронных страницах по электронным адресам: <http://www.vniiki.ru>, <http://www.gost.ru> или по Указателю «Национальные стандарты», выпускаемому издательством «Информстандарт».

## Лабораторная работа № 1

### ИСПЫТАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ СТАЛЕЙ

(4 часа)

**Цель работы** – приобрести практические навыки испытаний листовых электротехнических сталей.

**Задачи работы:**

- изучить различные типы испытаний электротехнической стали;
- изучить требования нормативной документации к испытательному оборудованию при определении удельных потерь на перемагничивание;
- составить протокол испытания трансформаторной текстурованной стали.

#### 1.1 Теоретическое введение

*Электротехнические стали* (ЭТС) – это класс магнитомягких материалов на основе сплава Fe–Si, предназначенных для изготовления магнитопроводов в электротехнических изделиях. Свойства ЭТС в значительной степени определяют характеристики, экономичность, габариты устройств и возможность их совершенствования, поэтому улучшению технологии производства и повышению характеристик ЭТС, особенно их магнитных свойств, уделяется большое внимание.

##### 1.1.1 Общие сведения о ЭТС

ЭТС применяются преимущественно в трех видах изделий:

- а) электрические машины (генераторы и электродвигатели),
- б) трансформаторы (преимущественно силовые, работающие при низких частотах),
- в) выключающие устройства (электромагнитные реле).

В соответствии с областью применения ЭТС подразделяют на динамные, трансформаторные и релейные. Для динамных и трансформаторных сталей требуются высокое значение индукции насыщения и малые потери на перемагничивание. Различие применений этих сталей в том, что в трансформаторных сталях направление магнитного поля неизменно, а динамные стали используются в магнитопроводах, в которых магнитный поток либо вращается, либо охватывает все направления в плоскости листа. Поэтому трансформаторные ста-

ли могут быть текстурованными. Более того, в трансформаторных сталях создание кристаллической текстуры является способом снижения магнитных потерь. В динамных сталях такой способ неприемлем, они должны быть изотропными.

Современные электротехнические стали представляют собой сплавы железа с кремнием и иногда алюминием при малом содержании углерода (углерод является вредной примесью, снижающей магнитные свойства). Добавка кремния к железу уменьшает магнитную анизотропию, препятствующую легкому перемагничиванию материала.

В электротехнических сталях увеличение массовой доли кремния снижает как константу магнитокристаллической анизотропии  $K_1$  (с 45 кДж/м<sup>3</sup> при 1 % до 28 кДж/м<sup>3</sup> при 4,5 %), так и магнитострикцию насыщения  $\lambda_s$ , что облегчает перемагничивание материала и уменьшает потери на гистерезис. Кроме того, введение кремния резко повышает удельное электрическое сопротивление

$$\rho = a + b[\text{Si}], \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, мкОм·мм;

$a$  – эмпирическая константа,  $a = 0,1$  мкОм·мм;

$b$  – эмпирическая константа,  $b = 0,12$  мкОм·м/%;

$[\text{Si}]$  – массовая доля кремния, %,

вследствие чего снижаются потери на вихревые токи. Однако легирование железа кремнием приводит к нежелательному снижению индукции насыщения в соответствии с эмпирической формулой Гумлиха

$$B_s = B_s^{\text{Fe}} - C[\text{Si}], \quad (1.2)$$

где  $B_s$  – индукция насыщения стали, Тл;

$B_s^{\text{Fe}}$  – индукция насыщения чистого железа,  $B_s^{\text{Fe}} = 2,16$  Тл;

$C$  – эмпирическая константа,  $C = 0,048$  Тл/%;

$[\text{Si}]$  – массовая доля кремния, %.

Из-за увеличения хрупкости ЭТС при увеличении массовой доли кремния и связанных с этим трудностей обработки и использования максимальное содержание кремния в промышленно выпускаемых электротехнических сталях не превышает 4,8 %.

Различными технологическими приемами может быть достигнуто такое текстурное состояние, при котором ребро куба  $[001]$  (направление легкого намагничивания) совпадает с направлением холодной