

## Введение

Конструкционная прочность материалов играет важную роль в обеспечении надежной и долговечной работы деталей машин и агрегатов. Создание новых образцов техники в авиационной, машиностроительной, нефтегазодобывающей и других отраслях промышленности предъявляет более жесткие и повышенные требования к работоспособности конструкций. Это обуславливает необходимость применения материалов с более высоким комплексом физико-механических свойств. Для металлических материалов данная проблема решается либо путем создания новых композиций сплавов, либо разработкой новых высокоэффективных термомеханических способов направленного воздействия на структуру серийных промышленных сплавов.

Возможности легирования к настоящему времени во многом уже исчерпаны. Кроме того, разработка совершенно новых сплавов требует больших материальных затрат по созданию новых композиций, их сертификации и внедрению. Между тем в последние десятилетия интенсивно развивается новое направление в материаловедении и обработке материалов, заключающееся в формировании в металлах и сплавах ультрадисперсных структурных состояний. Это позволяет резко повысить удельную прочность в области эксплуатационных температур, при этом в области температур обработки давлением существенно повышается технологическая пластичность. На базе этого направления можно создать принципиально новый комплекс физико-химических и механических свойств в обычных промышленных материалах. Это касается субмикроструктурных (СМК) и нанокристаллических (НК) металлов и сплавов, с размером зерен до 0,1 мкм и менее.

Получение материалов с ультрадисперсной структурой и композитов на их основе на сегодняшний день является сложной технологической проблемой. Наиболее перспективным способом изготовления полуфабрикатов с СМК и НК структурой является деформационно-термическая обработка, включающая интенсивную пластическую деформацию (ИПД), достигаемую обычными методами обработки металлов давлением.

## Лабораторная работа №1

### Изучение влияния текстуры на магнитные свойства электротехнической стали осциллографическим методом

Цель работы: изучение зависимости основных магнитных характеристик электротехнических сталей от кристаллографической текстуры.

Задачи работы:

- получение динамической петли гистерезиса изучаемых образцов осциллографическим методом;
- определение максимальной индукции, протяженности линейного участка, магнитной проницаемости линейного участка, коэрцитивной силы и остаточной индукции для образцов, полученных методами горячей и холодной прокатки.

## 1. Теоретическая часть

Коэрцитивная сила, магнитная проницаемость и остаточная индукция являются структурно чувствительными характеристиками и зависят размера зерен, плотности дислокаций, наличия дисперсных фаз (в частности, цементита) и внутренних напряжений, а также от кристаллографической текстуры.

В работе используются сплавы системы железо-кремний с содержанием Si около 3%, полученные разными способами. Диаграмма состояния железо-кремний представлена на рисунке 1. Под влиянием кремния области устойчивого существования  $\alpha$ -Fe расширяются до полного слияния. Это позволяет проводить высокотемпературный рекристаллизационный отжиг кремнистых сталей в  $\alpha$ -состоянии для увеличения размера зерен, создания острой текстуры и, даже, получать монокристаллы. Увеличение размера зерен заметно снижает  $H_c$  и  $B_r$ , и увеличивает  $\mu$ . Следующий этап в повышении указанных свойств

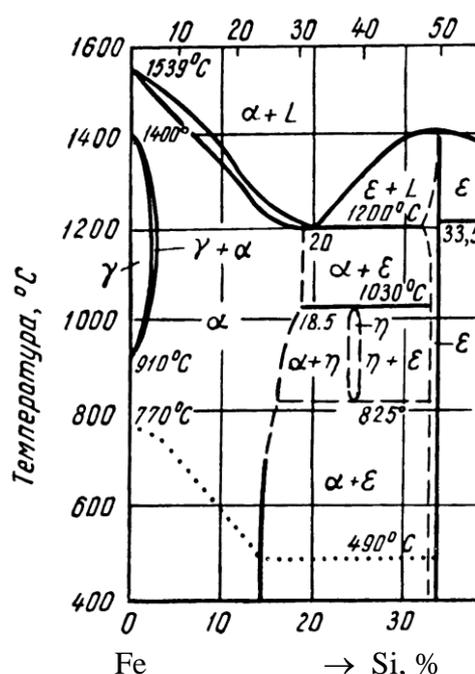


Рисунок 1 – Диаграмма равновесия Fe-Si

заключается в создании острой кристаллографической текстуры.

Электротехническую сталь, чаще всего, применяют в виде листов толщиной 0,35 мм, получаемых прокаткой с последующим отжигом. Горячую прокатку осуществляют при температуре 1350—1370 °С на этапе толстолистового проката и снижают температуру до 1200 – 900°С по мере уменьшения толщины с целью снижения окисления поверхности полосы. При этих температурах в стали с ОЦК решеткой могут равноценно действовать несколько систем скольжения (рисунок 2), что приводит к бестекстурному состоянию листа.

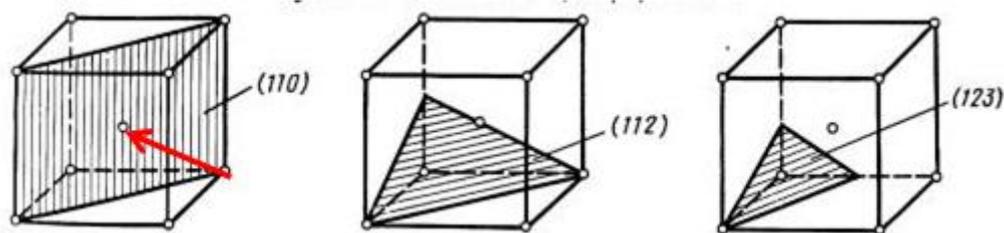


Рисунок 2 – Характерные плоскости скольжения в ОЦК решетке

При холодной прокатке листа наиболее активной становится плоскость легкого скольжения (110). Принцип формирования текстуры в условиях ограниченного числа систем скольжения показан на рисунке 3.

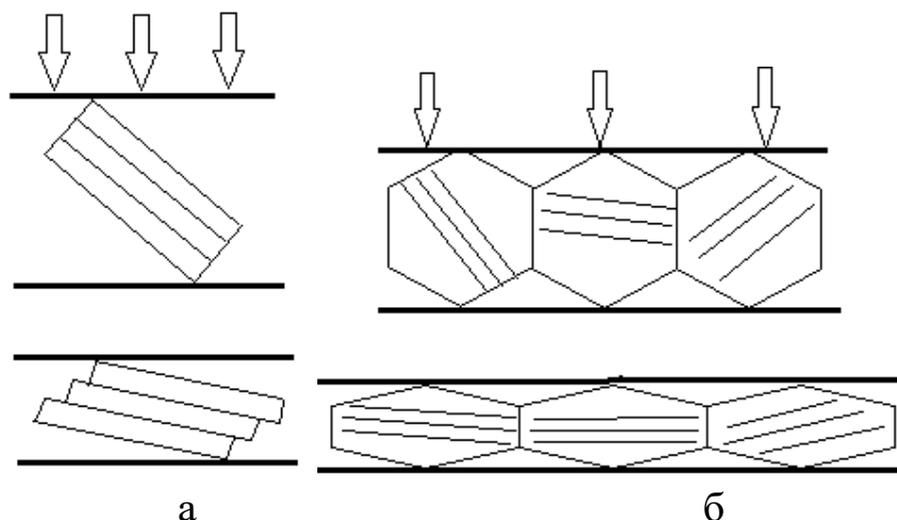


Рисунок 3 – Деформационный сдвиг с поворотом в монокристалле (а) и формирование текстуры в поликристаллическом материале (б)

При холодной прокатке с обжатием до 70% формируется полосовая текстура с двумя главными симметричными компонентами  $\{111\} \langle 112 \rangle$  и слабая компонента  $\{110\} \langle 001 \rangle$ , которая имеет

большую подвижность границ и подавляет остальные. Последующий отжиг при 1100...1150 °С в сухом водороде приводит к получению текстуры рекристаллизации  $\{110\} \langle 001 \rangle$ , которая называется ребровой (рисунок 4). Существует также технология получения листов с кубической текстурой.

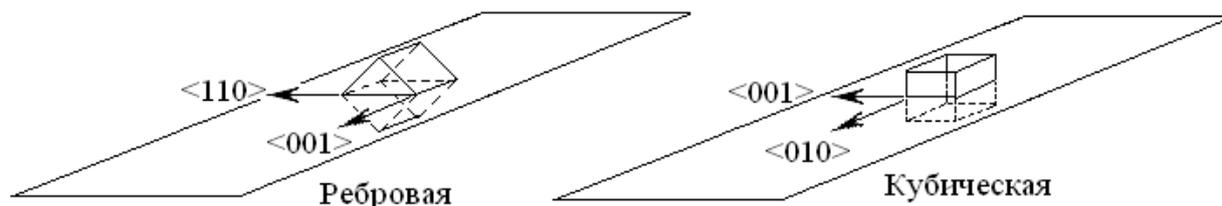


Рисунок 4 – Виды текстуры электротехнической стали

Текстура существенно влияет на магнитные свойства электротехнической стали. Особенно наглядно это выражено на кривых начального намагничивания монокристалла Fe-3%Si (рисунок 5), из которых видно, что направление  $\langle 100 \rangle$  обладает существенно большей магнитной проницаемостью и намагниченностью насыщения. Семейство направлений  $[100]$  называют осью легкого намагничивания (ОЛН).

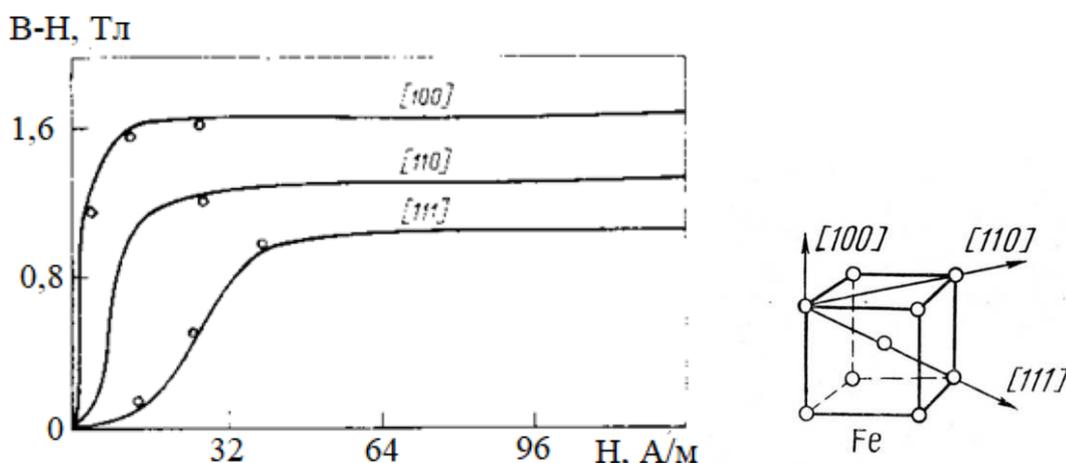


Рисунок 5 – Анизотропия свойств монокристалла Fe-3%Si

В бестекстурных горячекатаных листах ОЛН различных зерен направлены хаотично (рисунок 6, а). Свойства такого материала изотропны, поэтому его применяют для изделий, получаемых методом вырубки. В текстурованных листах ОЛН преимущественно направлены вдоль направления прокатки (рисунок 6, б). Свойства такого материала в продольном и поперечном направлениях различны.

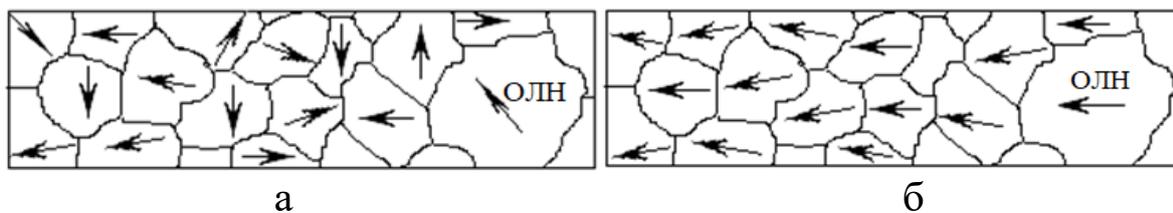


Рисунок 6 – Схемы бестекстурного (а) и текстурованного (б) образцов

В данной работе предлагается экспериментально установить зависимость  $H_c$ ;  $\mu$  и  $B_r$  от кристаллографической текстуры. С этой целью используются образцы электротехнических сталей марок Э31 и Э330 с одинаковым содержанием кремния (3%), но с различной структурой. Сталь Э31 горячекатаная, бестекстурная; Э330 – текстурованная, холоднокатаная с "ребровой" текстурой. Вдоль направления прокатки здесь ориентировано направление  $\langle 100 \rangle$ , а поперек листа направление  $\langle 110 \rangle$ . В работе предлагается исследовать образцы, вырезанные вдоль и поперек направления прокатки и сравнить их свойства между собой и с горячекатаной сталью Э31, близкой по содержанию кремния. Данные образцов приведены в приложении.

В предложенном методе материалы испытываются в переменном магнитном поле и намагничиваются периодически от положительного до отрицательного амплитудного значений с частотой изменения внешнего поля. Магнитное состояние при этом изменяется по петле гистерезиса, которая называется динамической петлей. При одном и том же значении максимальной индукции динамическая петля обычно несколько шире статической петли гистерезиса Из-за потерь на вихревые токи.

## 2. Практическая часть

### 2.1. Методика исследования

Одним из распространенных методов измерения магнитных свойств ферромагнитных веществ является осциллографический метод. К достоинствам метода относится возможность визуального наблюдения и изучения влияния различных факторов (деформации, температуры, магнитного поля и т.д.) на магнитные характеристики

исследуемого материала. Недостатками метода являются сравнительно невысокая точность измерений (5–7%).

Для того чтобы получить на экране осциллографа запись петли гистерезиса, необходимо подать на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки напряжение, пропорциональное индукции в исследуемом образце, на горизонтально отклоняющие пластины – напряжение, пропорциональное намагничивающему полю. На рисунке 7 показана принципиальная схема установки, которая позволяет получать такие напряжения.

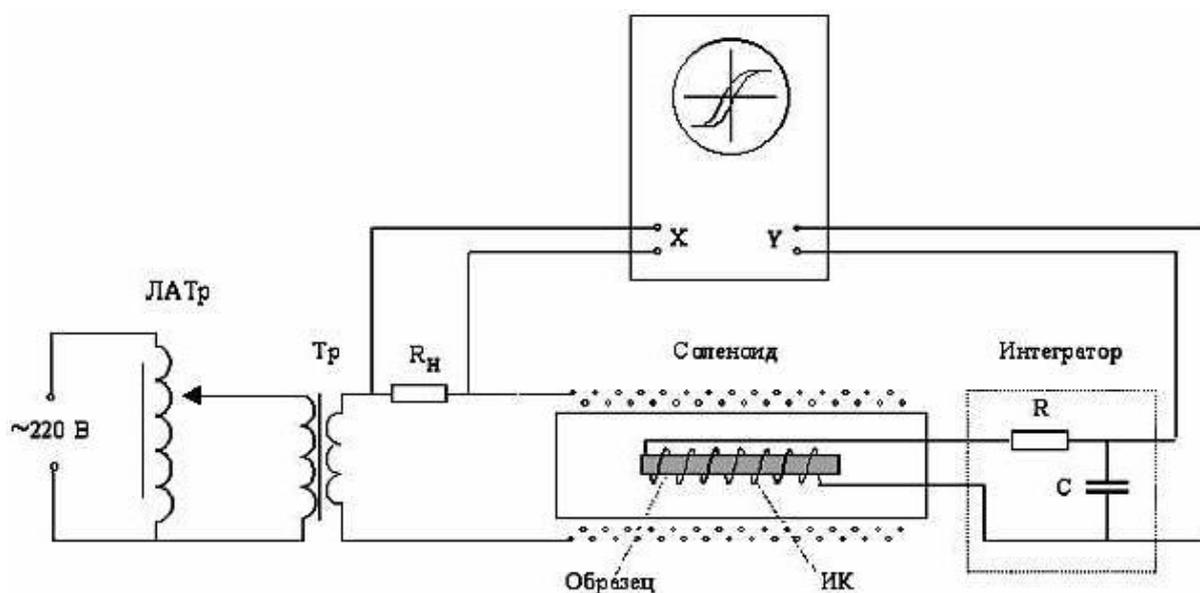


Рис. 7 Принципиальная схема установки для получения динамической петли гистерезиса.

На усилитель канала «X» осциллографа подается напряжение с эталонного сопротивления  $R_H$ , включенного последовательно в цепь намагничивающей обмотки соленоида. Падение напряжения  $U_H$  на сопротивлении  $R_H$  прямо пропорционально величине тока в намагничивающей обмотке  $i_m$ . Эта зависимость, выраженная через амплитудные значения тока и напряжения, будет иметь вид:

$$U_H = i_m R_H \quad (1)$$

Максимальное значение напряженности намагничивающего поля в образце  $H_m$  (без учета размагничивающего поля) связано с амплитудным значением тока в соленоиде  $i_m$  соотношением:

$$H_m = ki_m, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная соленоида. Учитывая (1), получаем

$$H_m = \frac{kU_H}{R_H} \text{ (А/м)}, \quad (3)$$

Отсюда видно, что напряженность магнитного поля в образце  $H_m$  пропорциональна амплитудному значению напряжения  $U_H$  на эталонном сопротивлении.

Магнитную индукцию образца определяют по величине ЭДС  $E$  в измерительной катушке (ИК), возникающей при изменении в ней магнитного потока. Согласно закону Фарадея эта ЭДС связана с изменением магнитной индукцией по формуле

$$E = -nS dB/dt, \quad (4)$$

где  $n$  – число витков измерительной катушки;  $S$  – сечение образца;  $B$  – магнитная индукция в образце. После интегрирования выражения (4) найдем

$$B = -\frac{1}{nS} \int E dt. \quad (5)$$

Таким образом, для определения магнитной индукции в образце  $B$  нужно проинтегрировать сигнал  $E$ , наведенный в измерительной катушке меняющимся магнитным полем.

Интегрирование сигнала возможно с помощью электрической схемы. Простейшая схема интегратора состоит из последовательно соединенных резистора  $R$  и конденсатора  $C$  (рисунок 7).

Изменение величины тока, текущего по соленоиду, осуществляется автотрансформатором ЛАТр. Регистрирующим прибором служит осциллограф С1-83. Напряжение, подаваемое на вход «Х» осциллографа, пропорционально току (1). Величина тока в соленоиде определяет по формуле (2) напряженность магнитного поля. Следовательно, величина напряжения, подаваемого на вход «Х» осциллографа, пропорциональна напряженности магнитного поля

$$U_X = U_H = \frac{R_H}{k} H_m, \quad (8)$$

Величина напряжения, подаваемого на вход «У» осциллографа определяется формулой:

$$U_Y = U_B = \frac{nS}{RC} B \quad (9)$$

где  $B$  – значение магнитной индукции в образце.

Следовательно, амплитуда напряжения  $U_Y$  пропорциональна максимальному значению индукции  $B_m$ .

Перепишем соотношения (8) и (9) в виде:

$$H_m = \frac{k}{R_H} U_X \text{ (А/м)}; \quad (10)$$

$$B_m = \frac{RC}{nS} U_Y \text{ (Т)}. \quad (11)$$

Таким образом, видно, что измерение магнитного поля и индукции сводится к измерению по осциллографу электрических напряжений  $U_X$  и  $U_Y$ .

При градуировке шкалы необходимо учитывать цену деления, обозначенную на шкале переключателей осциллографа.

## 2.2. Порядок выполнения работы.

Включить установку в следующем порядке. Ручку регулировки выходного напряжения ЛАТРа вывести в крайнее левое положение (против часовой стрелки), затем присоединить вилки ЛАТРа и осциллографа в розетки. Включить кнопку «Сеть» осциллографа. Дать прогреться приборам в течении трех минут. Поставить образец в измерительную ячейку и поместить внутрь соленоида. Ручку регулировки ЛАТРа перевести в среднее положение и настройкой усиления осциллографа по каналам «Х» и «Y» добиться четкого изображения петли гистерезиса на экране.

Получите и зарисуйте с экрана осциллографа изображения петли гистерезиса для образцов Э31 и Э330 (вдоль и поперек направления прокатки). По высоте петли определите максимальную индукцию. По наклону линейного участка петли определить магнитную проницаемость образцов. По пересечению петель с осями координат определите значения  $H_c$  и  $B_r$ .

По координатам вершин частных петель гистерезиса построить основные кривые намагничивания, определить начальную и максимальную магнитную проницаемость,  $\mu$  используя формулу:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Примечание: все графические данные должны быть представлены в отчете в единицах магнитного поля, индукции и проницаемости в системе СИ.

### **3. Контрольные вопросы:**

1. В чем состоит принцип осциллографического метода исследования ферромагнитных материалов, как измеряется напряженность магнитного поля и индукция?
2. Чем ограничена точность измерения?
3. Почему величина индукции не линейно зависит от напряженности поля?
4. Что характеризует коэрцитивная сила ферромагнетика?
5. Каким образом можно объяснить остаточную намагниченность?
6. Чем вызвана анизотропия свойств стали Э330?

### **4. Список литературы**

1. Лившиц Б.Г., Крапошин В.С., Линецкий Я.Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1998, 318 с. с илл.
2. Физическое металловедение: в 3-х т., под ред. Кана Р.У., Хаазена П.Т. т.3: Физико-механические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1987, 663 с.
3. Кекало И.Б., Самарин Б.А. Физическое металловедение прецизионных сплавов. Сплавы с особыми магнитными свойствами. М.: Металлургия, 1989, 624 с.
4. Сидякин В.Г. Техника физического эксперимента. М.: Изд. «ГЭИ», 1970. 302 с.

## 5. Приложения

### 5.1. Параметры установки

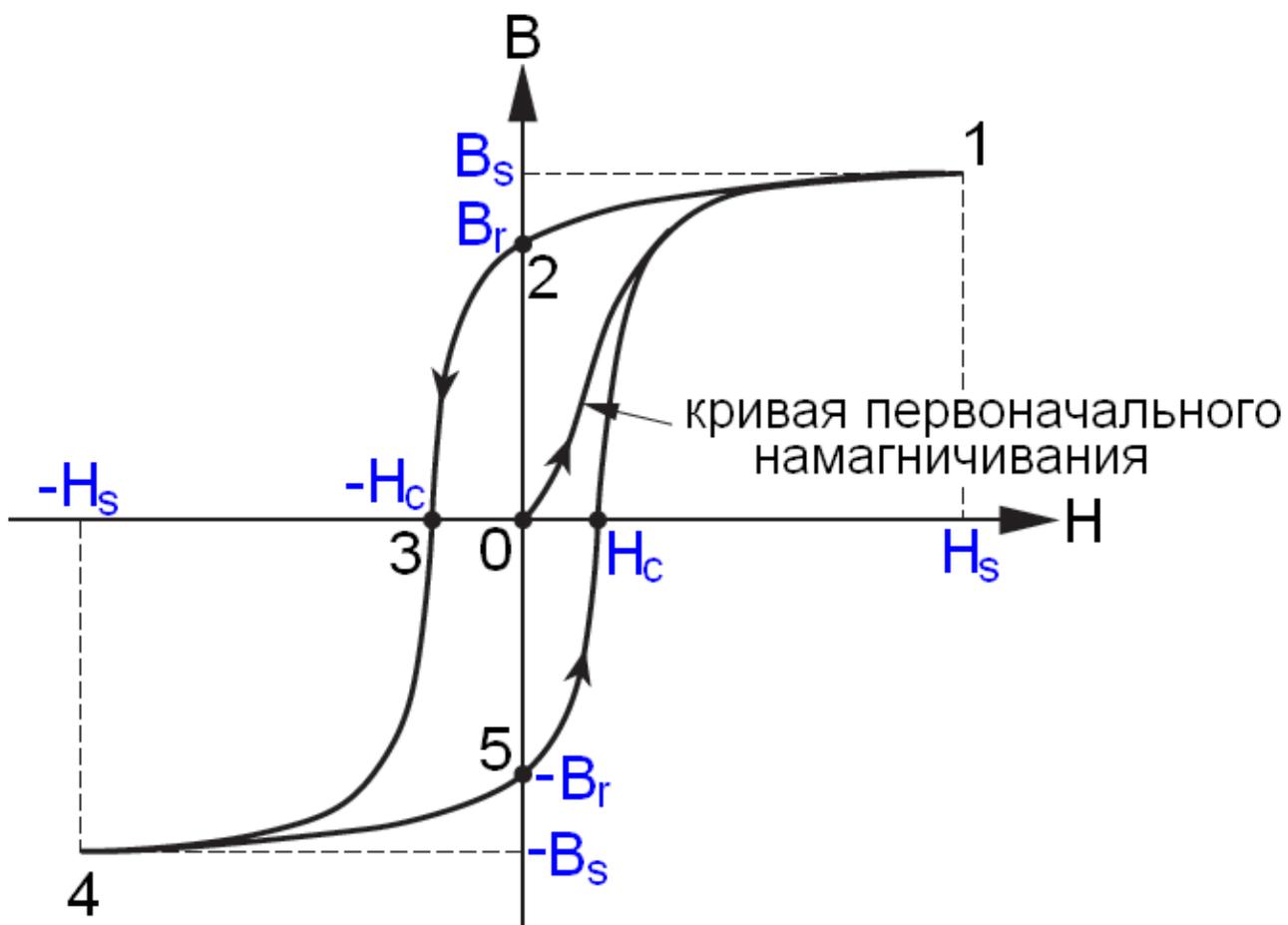
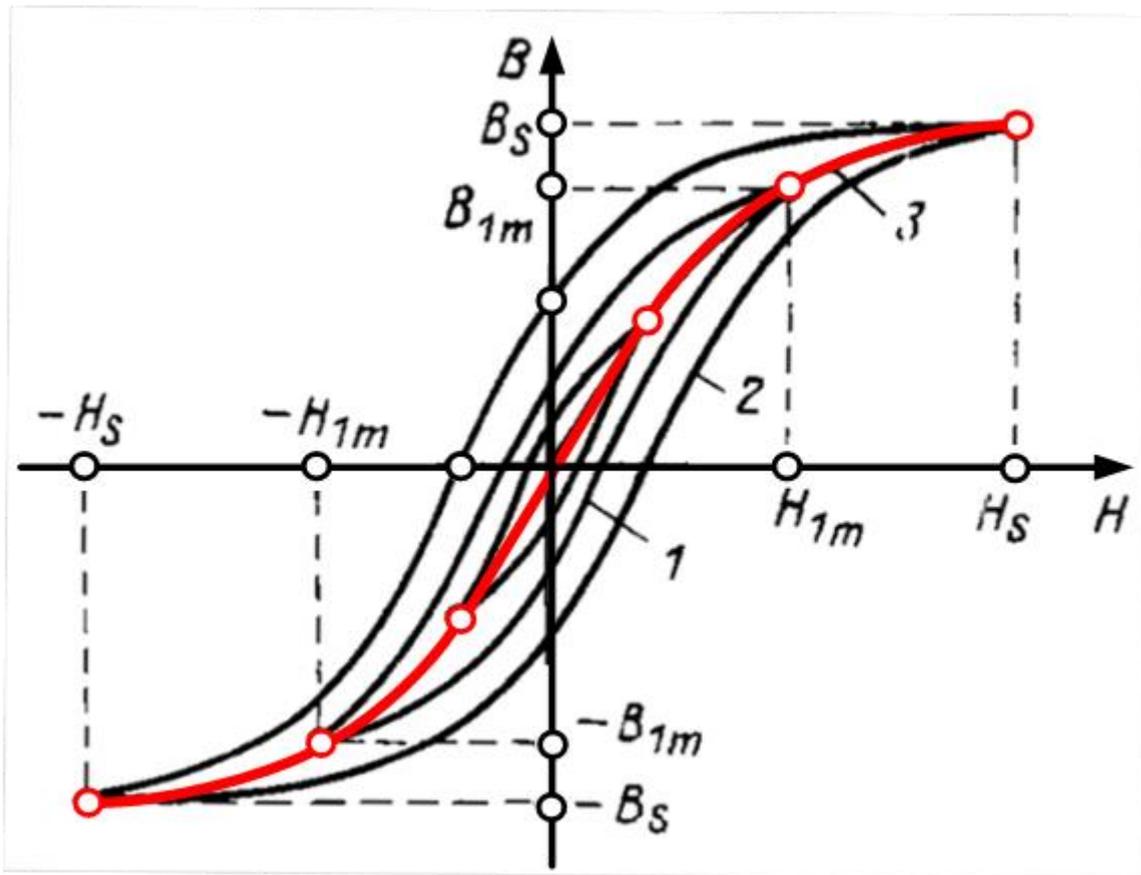
Сопротивление в цепи соленоида	33 Ом;
Постоянная соленоида:	$k = 8000 \text{ 1/м}$ ;
Параметры интегрирующей схемы:	$R = 200 \text{ кОм}$ ;
	$C = 2,0 \text{ мкФ}$ .
Количество витков измерительной катушки:	$n = 550$ .

### 5.2. Маркировка и размеры образцов

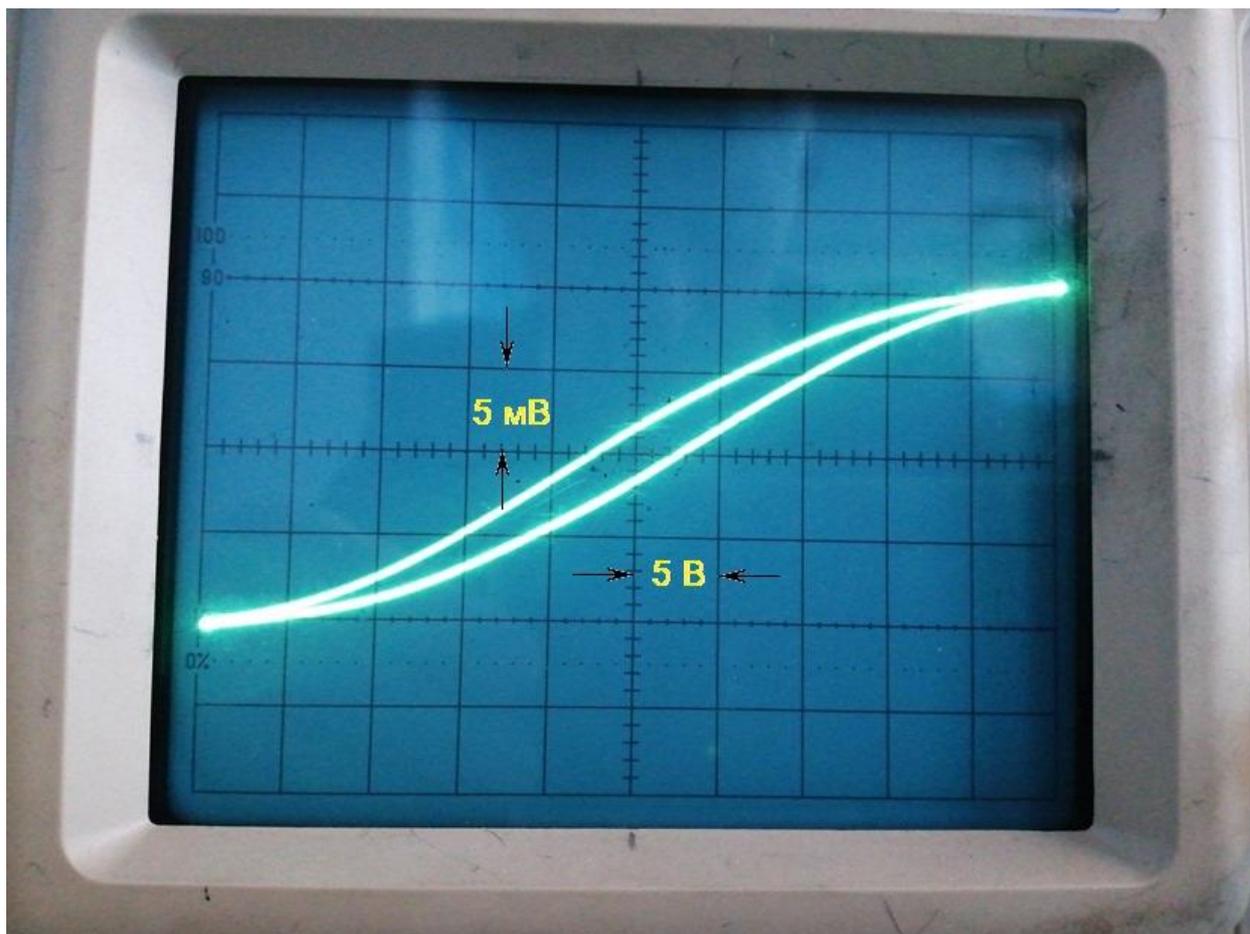
Маркировка		Содержание Si, %	Размеры, мм		
на образцах	по ГОСТ		толщина	ширина	количество
Э0	1101	0,4 – 0,8	0,5	8	-
Э11	1211	0,8 – 1,8	0,5		-
Э21	1312	1,8 – 2,8	0,35		-
Э31	1412	2,8 – 3,8	0,35		2
Э41	1512	3,8 – 4,8	0,35		-
Э330 (В)	3313	2,8 – 3,8	0,35		2
Э330 (П)	3313	2,8 – 3,8	0,35		2

### 5.3. Единицы измерения магнитных величин в системе СИ.

Название величины	Обозначение	Единица измерения
Напряженность магнитного поля	H	A/м (Ампер на метр)
Индукция магнитного поля	B	T (Тесла)
Магнитный поток	Ф	Вб (Вебер)
Магнитная постоянная	$\mu_0$	Гн/м (Генри на метр)



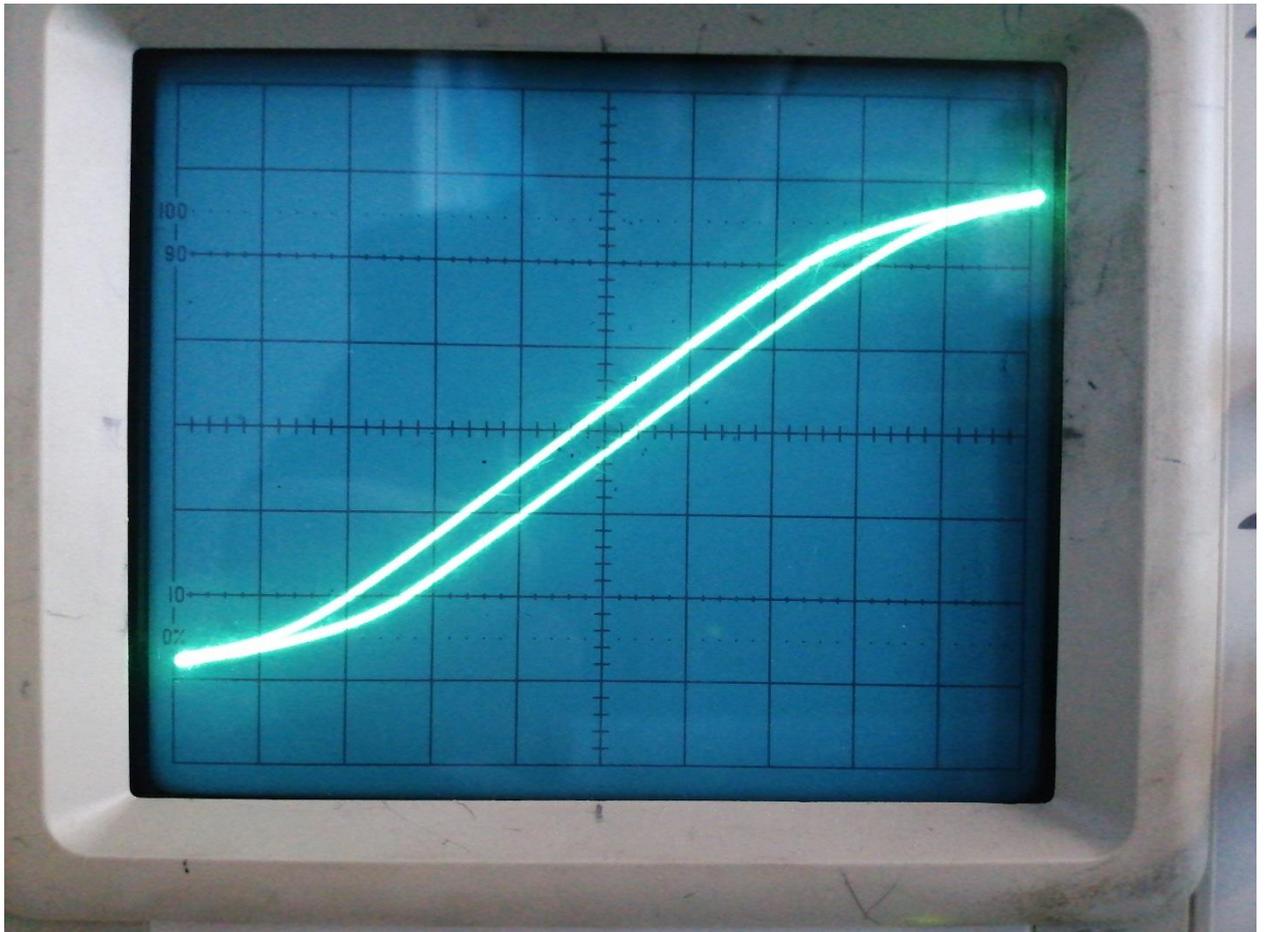
## Примеры данных для лаб 1: сталь 3% Si



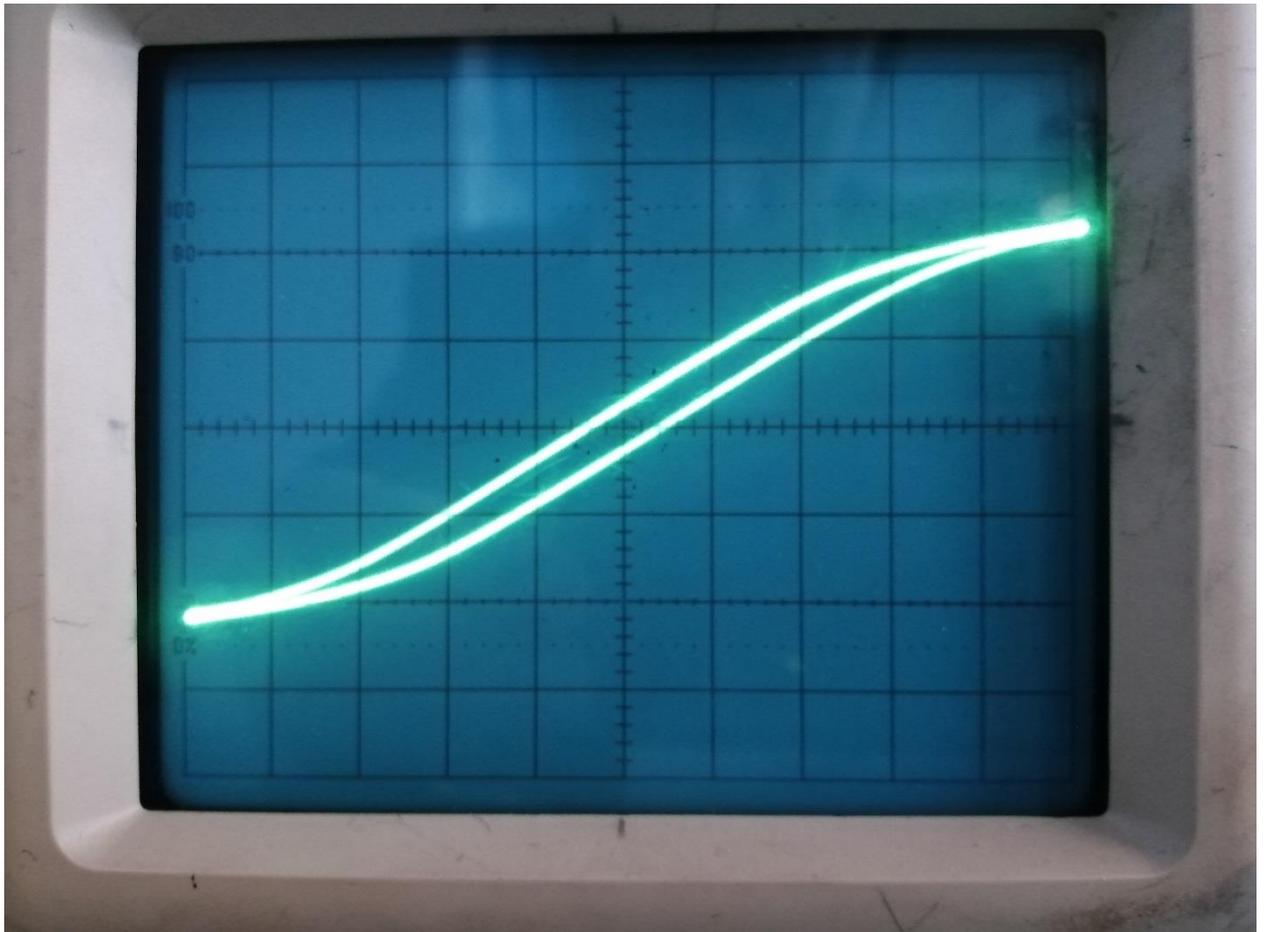
Без текстуры, горячекатаный лист

Получение текстуры  $\{110\} \langle 001 \rangle$  : холодная прокатка до 70% обжатия, отжиг 1100..1150°C в сухом водороде.

При прокатке формируется полосовая текстура с двумя главными симметричными компонентами  $\{111\} \langle 112 \rangle$  и слабая компонента  $\{110\} \langle 001 \rangle$ , которая имеет большую подвижность границ и подавляет остальные.



Текстура  $\{110\} \langle 001 \rangle$ , измерение в направлении  $\langle 001 \rangle$



Текстура  $\{110\} \langle 001 \rangle$ , измерение в направлении  $\langle 110 \rangle$