

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«Влияние отжига под нагрузкой на магнитные свойства и  
структуру  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  лент»**

Выполнила студентка:  
419 группы  
Кожевникова Полина Яковлевна

---

Научный руководитель:  
К.ф.-м.н., м.н.с.  
Харламова Анна Михайловна

---

Допущена к защите: \_\_\_\_\_

Зав. Кафедрой магнетизма  
Д. ф.-м.н., профессор Перов Н.С.

Москва

2023

## Оглавление

Введение.....	3
ГЛАВА 1. Литературный обзор.....	4
1.1. Аморфные и нанокристаллические материалы.....	4
1.2. Получение аморфных лент.....	5
1.3. Кристаллизация сплава типа Finemet.....	7
1.4. Методики изучения лент.....	8
1.4.1. Классификация магнитооптических эффектов.....	9
1.4.2. Магнитная анизотропия.....	11
1.4.3. Размагничивающий фактор.....	13
1.5. Особенности составов с добавлением хрома, а также влияние нагрузки при отжиге.....	14
ГЛАВА 2. Методики эксперимента и изучаемые образцы.....	14
2.1. Метод изучения объемных магнитных характеристик.....	14
2.2. Магнитооптический метод исследования.....	16
2.3. Метод атомно-силовой микроскопии для изучения морфологии поверхности образцов.....	19
2.4. Изучаемые образцы.....	21
ГЛАВА 3. Результаты исследования $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ лент.....	22
3.1. Основные параметры $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ лент.....	22
3.2. Структурные свойства $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ лент.....	23
3.3. Морфология поверхности $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ образцов.....	24
3.4. Магнитные свойства $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ лент.....	25
3.5. Магнитооптические свойства $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ образцов.....	29
<b>Основные результаты и выводы.....</b>	<b>34</b>
Список литературы.....	36
Благодарности.....	39

## **Введение**

В последние три десятилетия наноструктурированные мягкие ферромагнитные сплавы на основе железа привлекают огромное внимание как для фундаментальных исследований, так и для технологических приложений из-за их необычных структурных, электрических, магнитных, оптических свойств и коррозионной стойкости [1]. В частности, были исследованы структура и магнитные свойства так называемого класса файнмет (FM) сплавов (сплав на основе Fe–Si–Nb–B–Cu). Данный сплав, получаемый в виде лент путем быстрой закалки из расплава, приобретает превосходные магнитомягкие свойства, что позволяет широко его применять в электро- и радиопромышленности, электронной технике и приборостроении [2]. Последние годы ведутся разработки магнитных элементов для высокочастотных приложений [3].

Аморфные ленты обычно отжигают при температурах выше температуры первичной кристаллизации, составляющей примерно 510°C, для получения оптимальной структуры и свойств. Было показано, что наведенная анизотропия является специальным инструментом для настройки магнитных откликов, позволяющим настраивать магнитную проницаемость с помощью отжига под напряжением [1].

До сих пор вопрос поиска наиболее эффективного состава лент остается актуальным. Сравнительно недавно были созданы новые сплавы путем добавления Cr и восстановления Fe по сравнению с классическим файнмет составом, что привело к повышению температуры кристаллизации и повышению коррозионной стойкости сплавов [1].

**Цель данной работы** – исследование влияния отжига под нагрузкой на магнитные свойства и структуру  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{V}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  лент.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые исследовано влияние отжига на ленты данного состава, а также исследована зависимость свойств лент данного состава от ширины.

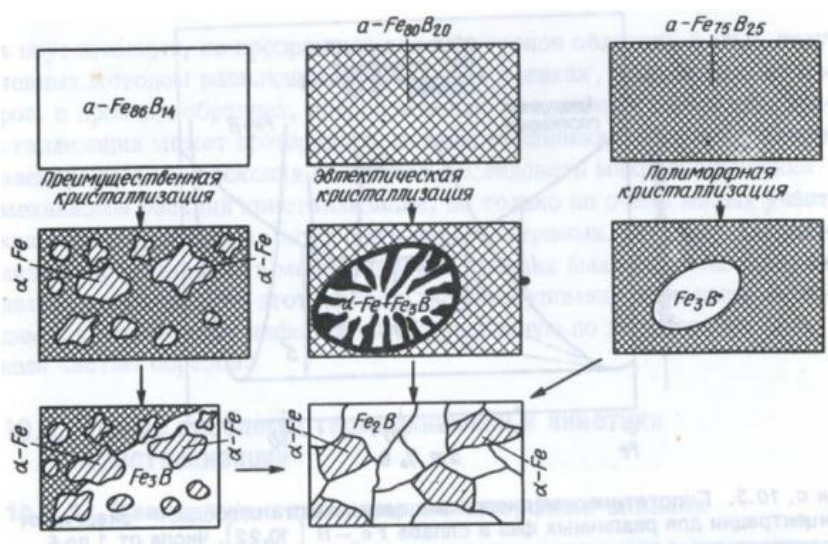
## ГЛАВА 1. Литературный обзор

### 1.1. Аморфные и нанокристаллические материалы

Аморфные материалы до сих пор активно изучаются, из-за их неповторимых характеристик по сравнению с кристаллическими материалами. Они имеют широкое практическое применение: основа для сердечников трансформаторов, магнитных датчиков и головок [4]. Аморфные ленты, как одна из областей исследования аморфных материалов, также представляют большой интерес с точки зрения фундаментальных исследований и практических применений.

Аморфные материалы характеризуются тем, что их атомная структура имеет ближний порядок и не имеет дальнего порядка, характерного для кристаллических структур.

При нагреве аморфных сплавов происходит их кристаллизация за счёт процессов зарождения и роста кристаллов при определённой температуре [5]. В зависимости от концентрации переход в кристаллическую фазу может происходить различными путями (Рис. 1).



**Рис. 1** Типичные схематические изображения реакций кристаллизации в аморфных сплавах Fe-B [6].

Полиморфная кристаллизация – кристаллизация, при которой аморфный сплав без изменения концентрации переходит в перенасыщенный сплав или

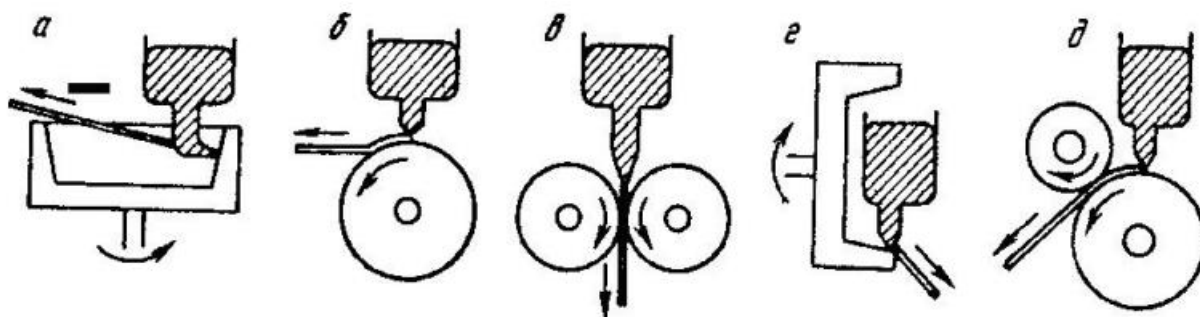
метастабильное или стабильное кристаллическое соединение. Такая реакция может происходить только в области концентраций, соответствующих чистым элементам или соединениям. Такие реакции могут происходить в области высоких концентраций железа и вблизи состава Fe<sub>3</sub>B.

Преимущественная (первичная) кристаллизация одной из фаз, например  $\alpha$ -Fe. При такой реакции аморфная фаза обогащается бором, пока дальнейшая кристаллизация не прекратится при достижении метастабильного равновесия системы  $\alpha$ -Fe + аморфный сплав Fe-B. Первичная кристаллизация фазы иного состава из аморфного состояния является первоначальной стадией кристаллизации многих аморфных сплавов. На первичной стадии может образовываться ограниченный по составу твердый раствор или промежуточная фаза. Скорость роста первичных кристаллов зависит от их морфологии.

Эвтектическая кристаллизация, то есть одновременная кристаллизация нескольких кристаллических фаз путем скачкообразной реакции. Такая реакция характеризуется наибольшей движущей силой и может происходить между двумя стабильными фазами во всей области концентраций. По обе стороны фронта реакции концентрация одинакова. На фронте реакции два компонента разделяются на две фазы, поэтому такая реакция продолжается более длительное время, чем полиморфная реакция, то есть реакция без разделения компонентов [6].

## **1.2. Получение аморфных лент**

Наиболее эффективными способами промышленного производства аморфных лент являются охлаждение струи жидкого металла на внешней (закалка на диске) или внутренней (центробежная закалка) поверхностях вращающихся барабанов или прокатка расплава между холодными валками, изготовленными из материалов с высокой теплопроводностью [7]. Принципиальные схемы методов приведены на рисунке 2.



**Рис. 2** Методы получения тонкой ленты путем закалки из расплава: а - центробежная закалка; б - закалка на диске; в - прокатка расплава; г - центробежная закалка; д - планетарная закалка на диске [7].

Расплав, полученный в индукционной печи, выдавливается нейтральным газом из сопла и затвердевает при соприкосновении с поверхностью вращающегося охлаждаемого тела (холодильника). В методах центробежной закалки и закалки на диске расплав охлаждается только с одной стороны. Основной проблемой является получение достаточной степени чистоты внешней поверхности, которая не соприкасается с холодильником. Метод прокатки расплава позволяет получить хорошее качество обеих поверхностей (контактной и свободной) ленты, что особенно важно для аморфных лент. Ранее было установлено, что магнитные свойства контактной и свободной сторон аморфных лент отличаются [8], [9]. В частности, коэрцитивная сила на свободной стороне ленты меньше в 2 – 3 раза, чем на контактной [8]. Объясняется это тем, что контактная и свободная сторона имеют разную морфологию и испытывают различающиеся напряжения в процессе изготовления ленты.

Для каждого метода имеются свои ограничения по размерам лент, поскольку есть различия и в протекании процесса затвердевания, и в аппаратном оформлении методов [7].

Если при центробежной закалке ширина ленты составляет до 5 мм, то прокаткой получают ленты шириной 10 мм и более. Метод закалки на диске, для которого требуется более простая аппаратура, позволяет в широких пределах изменять ширину ленты в зависимости от размеров плавильных

тиглей. Данный метод позволяет изготавливать как узкие ленты шириной 0.1-0.2 мм, так и широкие - до 100 мм, причем точность поддержания ширины может быть  $\pm 3$  мкм [7].

### 1.3. Кристаллизация сплава типа Finemet

Одним из наиболее распространённых способов получения частично нанокристаллической структуры является термообработка образцов выше температуры кристаллизации. Скорость зарождения и скорость роста образующихся кристаллов зависит от длительности и температуры отжига, поэтому для различных сплавов подбирают оптимальные характеристики [10].

Сплав файнмет получают из аморфного сплава Fe-Si-B с добавлением Cu и Nb для получения наноструктуры. После отжига при температурах 520-560°C в течении 0.5-3 часов сплав становится нанокристаллическим материалом с магнитомягкими свойствами. Сплав имеет две температуры кристаллизации: 510°C, выше которой образуются нанокристаллы, и 570°C, выше которой кристаллизуется окружение первичных нанокристаллов, обогащенное ниобием, а также происходит быстрый рост зерен и ухудшение магнитных свойств материала [11]. В результате образуется однородная структура, состоящая из относительно одинаковых по размеру ( $D \sim 10 - 15$  нм) нанокристаллов  $\alpha$  - Fe, равномерно распределенных в остаточной аморфной матрице. Схематический процесс кристаллизации сплава Finemet показан на (Рис.3).

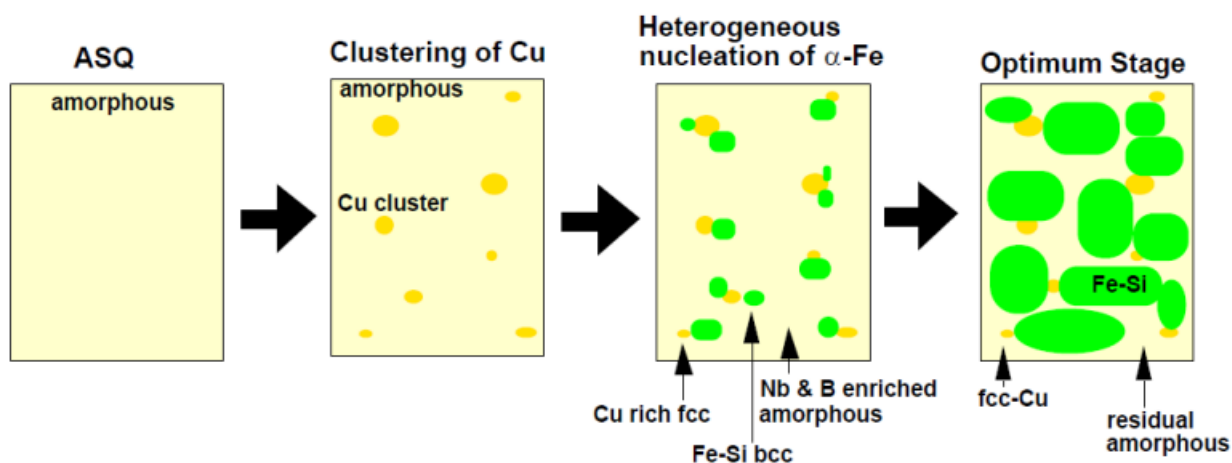
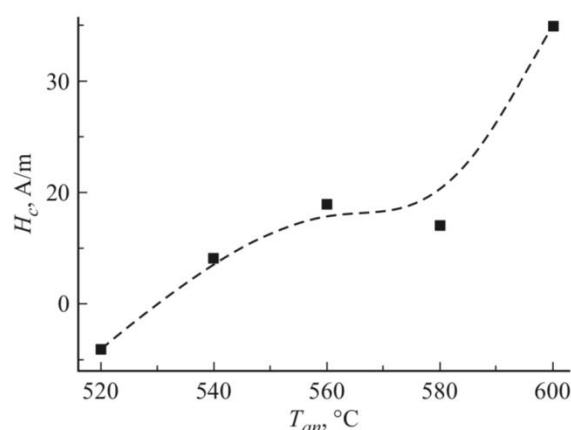


Рис. 3 Схематическое изображение процесса кристаллизации [12].

Кластеры меди становятся центрами кристаллизации FeSi. Ниобий препятствует росту кристаллов. В работе [13] исследовалось влияние температуры продолжительного отжига на структуру и магнитные свойства нанокристаллического сплава FeSiNbCuB. Было обнаружено что наименьшее значение коэрцитивной силы  $Fe_{73.5}Si_{13.5}Nb_3Cu_1B_9$  сплава наблюдается при температуре отжига 520°C (Рис.4).



**Рис. 4** Зависимость коэрцитивной силы,  $H_c$ , от температуры отжига  $T_{am}$  в интервале температур от 520 до 600°C [13].

Ухудшение магнитомягких свойств нанокристаллического сплава  $Fe_{73.5}Si_{13.5}Nb_3Cu_1B_9$  при повышении температуры отжига от 520 до 580°C объясняется уменьшением концентрации кремния в нанокристаллах FeSi, которое приводит к росту константы магнитокристаллической анизотропии от 8.4 до 11.2 кДж/м<sup>3</sup> [13].

#### 1.4. Методики изучения лент

Основными изучаемыми характеристиками лент являются их структура, объёмные и поверхностные магнитные свойства, а также гигантский магнитоимпедансный эффект (ГМИ).



Методом рентгеновской дифракции с использованием  $\text{CuK}\alpha$  излучения изучается структура лент с целью подтверждения элементного состава образцов [14].

Шероховатость поверхности лент и профиль поверхности оцениваются, как правило, с помощью сканирующей электронной микроскопии в контактном или полуконтактном режимах.

Объёмные петли гистерезиса измеряются индуктивным методом или с помощью вибрационного магнитометра. С их помощью можно получить значения основных магнитных характеристик: коэрцитивную силу  $H_C$ , намагниченность насыщения  $M_S$ , поле насыщения  $H_S$ , поле анизотропии  $H_a$ , а также рассчитать константу анизотропии  $K$  [3].

Приповерхностные петли гистерезиса, а также доменная структура образцов изучаются магнитооптическими методами с помощью эффектов Керра.

Магнитоимпедансные измерения проводятся с использованием “микроразрывной” линии с характеристическим сопротивлением 50 Ом. Электрические контакты наносят проводящей серебряной краской для правильной установки ленты в держатель для микроволновой печи. Внешнее магнитное поле создаётся парой катушек Гельмгольца. Полное сопротивление ( $Z$ ) рассчитывается на основе коэффициента отражения  $S_{11}$  после надлежащей калибровки и математического вычитания вклада микроволнового прибора [3].

#### 1.4.1. Классификация магнитооптических эффектов

Намагниченный ферромагнетик, также как и слабомагнитное вещество, помещенное во внешнее магнитное поле, обнаруживает свойства двойного магнитного лучепреломления света. Это приводит к появлению различных магнитооптических эффектов на проходящем и отраженном свете [15].

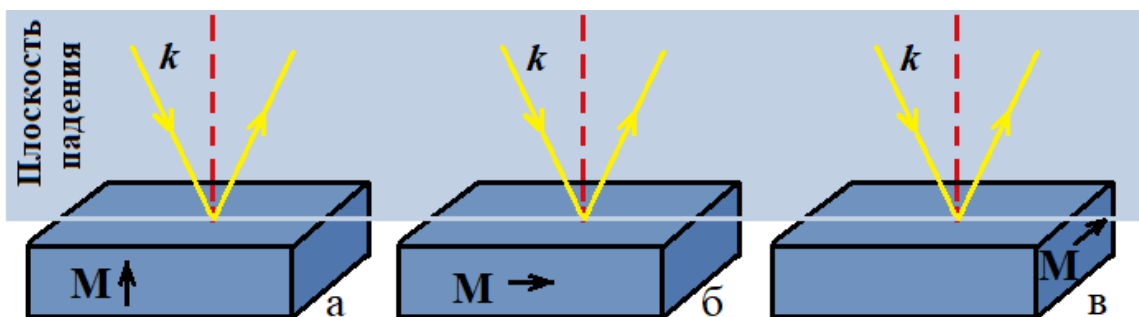
В случае слабомагнитных веществ двойное лучепреломление возникает в результате воздействия внешнего магнитного поля на образец. Магнитооптика ферромагнетиков определяется эффективными внутренними полями

(обменным, спин-орбитальным), действующими в ферромагнетике, а роль внешнего магнитного поля сводится к техническому намагничиванию кристалла. Таким образом, исследование магнитооптических явлений в ферромагнетиках позволяет получать информацию о природе ферромагнетизма металлов и сплавов.

Все известные магнитооптические эффекты были открыты во второй половине XIX столетия. В 50-е годы XX века магнитооптические методы стали использоваться для изучения энергетического спектра магнитоактивных ионов в ферромагнитных и антиферромагнитных диэлектриках, а также электронной структуры ферромагнитных металлов и сплавов. В настоящее время магнитооптические методы широко используются для исследования магнитных свойств как объемных, так и тонкопленочных магнитных систем нанометрового диапазона. В случае объемных магнитных материалов изучаются их приповерхностные магнитные свойства, что позволяет оценить вклад приповерхностных дефектов на изучаемые магнитные характеристики. В случае ультратонких материалов, например магнитных пленок, измеряются магнитные характеристики всего объема образца.

Магнитооптические эффекты классифицируются по методу их наблюдения: эффекты, наблюдаемые в проходящем свете, и эффекты, наблюдаемые на отраженном от магнитного кристалла свете [15]. Рассмотрим последние эффекты более подробно:

- Полярный (Рис. 5(а)) и меридиональный (Рис. 5 (б)) эффекты Керра проявляются во вращении плоскости поляризации и превращении линейно поляризованной волны в эллиптически поляризованную.
- Экваториальный (Рис. 5 (в)) эффект Керра состоит в изменении интенсивности и сдвиге фаз линейно поляризованного света, отраженного от намагниченного образца.



**Рис. 5** Магнитооптический эффект Керра: полярный (а), меридиональный (б) и экваториальный (в).

На практике магнитооптические эффекты широко используются для измерения кривых намагничивания, петель гистерезиса и приповерхностных магнитных характеристик объемных образцов.

#### 1.4.2. Магнитная анизотропия

Магнитная анизотропия – зависимость магнитных свойств ферромагнетика от направления намагниченности по отношению к структурным осям образующего его кристалла. Известно, что кривые намагничивания вдоль различных кристаллографических осей ферромагнетика различаются. Вдоль одних намагничивание до насыщения достигается при существенно меньших магнитных полях, чем в других направлениях [16].

Осями лёгкого намагничивания (ОЛН) называются кристаллографические направления, вдоль которых насыщение достигается при самых малых полях, а осями трудного намагничивания (ОТН) – направления, вдоль которых насыщение намагничивания достигается при самых больших магнитных полях.

Энергией кристаллографической анизотропии называется та часть энергии кристалла, которая зависит от ориентации вектора намагничивания относительно кристаллографических осей. Её минимум достигается, когда намагниченность направлена вдоль осей лёгкого намагничивания. Энергия пропорциональна константе анизотропии.

Физической причиной существования анизотропии является спин-орбитальное взаимодействие [16].

Для лент лёгкой осью является направление вдоль длинной стороны. Отжиг под нагрузкой приводит к поперечной наведённой анизотропии. Она является специальным инструментом для настройки магнитных откликов, позволяющим настраивать магнитную проницаемость [1].

Константу наведенной магнитной анизотропии можно рассчитать по формуле:

$$K_u = \frac{1}{2} M_s H_a, \quad (1)$$

где  $M_s$  - намагниченность насыщения,  $H_a$  – поле анизотропии [3]

В работе [17], посвященной изучению влияния кристаллизующего отжига под нагрузкой на магнитные свойства и структуру магнитомягкого сплава FeSiNbCuB, легированного хромом, имеется уточнение. Для оценки константы магнитной анизотропии  $K_u$ , наведённой в результате отжига под нагрузкой, авторы рекомендуют использовать формулу:

$$K_u = K_u^{TSA} - \Delta, \quad (2)$$

где  $K_u^{TSA}$  - константа анизотропии, рассчитанная для образцов, отожжённых под нагрузкой (после термомеханической обработки), а константа  $\Delta$  характеризует отклонение петли гистерезиса от вертикальной оси и рассчитывается по формуле (3), если положить, что  $\Delta = K_u$ :

$$K_u = -0.5 \cdot 10^4 \times B_m \times H_s, \quad (3)$$

где  $B_m$  – максимальная намагниченность в Т,  $H_s$  - поле насыщения в А/м [17]. Авторы рассчитали значения констант анизотропии для образцов  $Fe_{73.5-x}Cr_xSi_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ , отожжённых при температуре 520°C в течение 2 часов без нагрузки (НО – нанокристаллизующий отжиг) и под нагрузкой 160 Мпа (ТМехО - термомеханическая обработка (отжиг и охлаждение под растягивающей нагрузкой)), с различной концентрацией хрома  $C_{Cr}$ . Данные представлены в таблице 1.

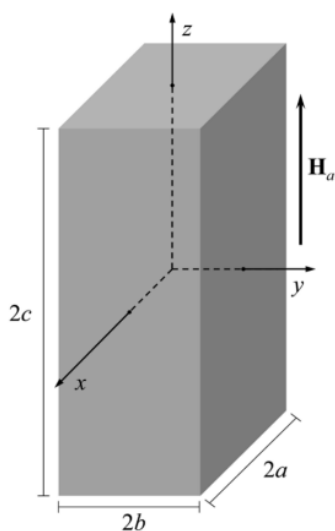
Таблица 1. Рассчитанные значения констант анизотропии [17].

	$C_{Cr}$ , at. %	$-\Delta$ , Дж/м <sup>3</sup>	$-K_u$ , Дж/м <sup>3</sup>
НО	0	15	-
	3	10	-
	<b>5</b>	<b>31</b>	-
ТМехО	0	1700	1685
	3	1460	1450
	<b>5</b>	<b>1070</b>	<b>1040</b>

### 1.4.3. Размагничивающий фактор

Так как изучаемые образцы отрезаются от исходных лент и имеют разную длину, то важно учитывать их размагничивающий фактор  $N$ . При помещении образца во внешнее поле  $H_e$  происходит его намагничивание. Создаётся так называемое размагничивающее поле  $NM$ . Тогда истинная напряжённость поля в образце  $H$  рассчитывается по формуле:

$$H = H_e - NM. \quad (4)$$



**Рис. 6** Исследуемая прямоугольная призма с координатами и приложенным полем [18].

Для лент рассчитать размагничивающий фактор можно только приблизительно. Профессор Чен и др. авторы в своей статье [18] рассчитывают коэффициент размагничивания прямоугольных призм (рис. 6). Расчёт  $N$  проводится, исходя из геометрических параметров призм, а именно, из значения величин  $c/\sqrt{ab}$  и  $a/b$  (см. Рис. 6). Их методику можно использовать в случае лент.

## **1.5. Особенности составов с добавлением хрома, а также влияние нагрузки при отжиге**

Изменение состава сплава, в том числе и добавление новых элементов, позволяет получать материал с заданными свойствами. Было найдено, что добавление хрома в сплаве файнмет повышает устойчивость материала к коррозии и повышенным температурам [19].

В работе [20] было обнаружено, что добавление хрома в классический состав приводит к повышению температуры кристаллизации сплава из аморфного в нанокристаллическое состояние. Так, если интервал первичной нанокристаллизации сплава Finemet составляет 510–590°C, то добавление в состав 1–5% хрома по данным ДСК постепенно увеличивает этот температурный интервал до 569–732°C при скорости нагрева 20 град/мин.

Структурные исследования, проведенные в работе [21], показали, что в нанокристаллическом состоянии после отжига при 520°C в течение двух часов все сплавы  $Fe_{73.5-X}Cr_XSi_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$  ( $X = 0, 1, 2, 3, 5$ ) содержали, в основном, зерна твердого раствора размером 10–12 нм с остатками аморфной фазы по их границам. Кроме того, было обнаружено, что увеличение содержания Cr до 5 % приводит к значительному увеличению  $H_c$  образцов за счет появления фаз  $Fe_2V$  и Cr при резком увеличении шероховатости поверхности.

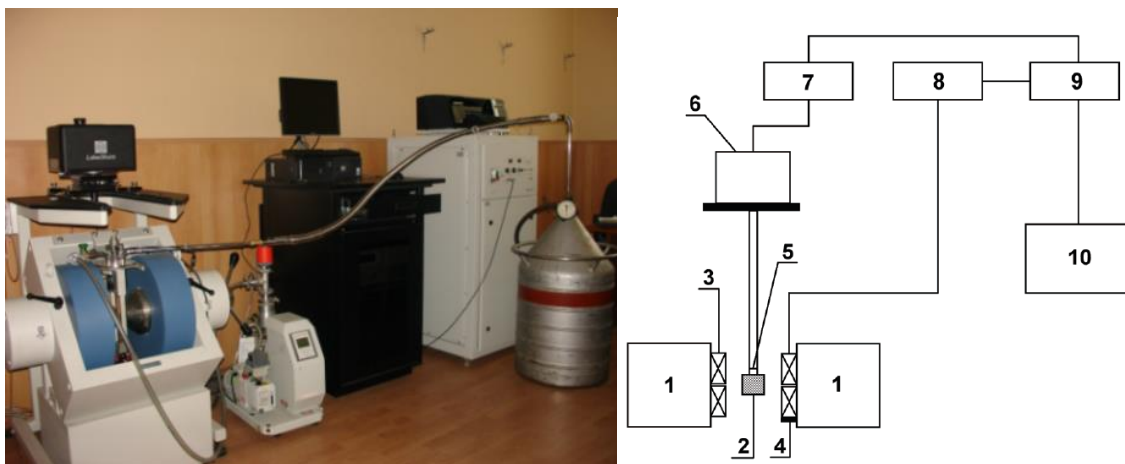
Отжиг под нагрузкой ведет к наведению поперечной магнитной анизотропии типа жёсткая ось. Добавление хрома ведёт к монотонному снижению максимальной намагниченности, увеличению коэрцитивной силы, также понижается объёмная доля нанокристаллитов, образующихся при отжиге [17].

## **ГЛАВА 2. Методики эксперимента и изучаемые образцы**

### **2.1. Метод изучения объёмных магнитных характеристик**

Объёмные магнитные характеристики изучаемых образцов были исследованы с помощью вибрационного магнитометра фирмы «Lake Shore VSM 7400» с чувствительностью  $10^{-5}$  Гс×см<sup>3</sup> для измерения магнитного

момента объёмных и плёночных образцов. На рисунке 7 приведены изображения вибрационного магнитометра и блок-схема экспериментальной установки, подробно описанных в работе [22].



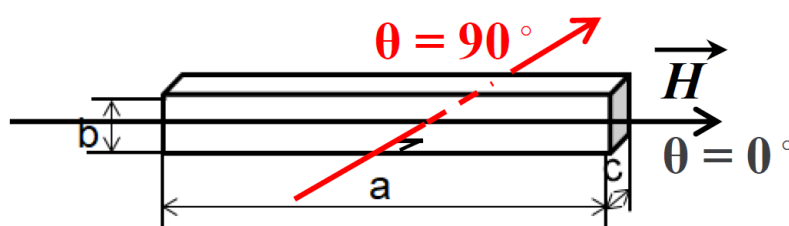
**Рис. 7** Вибрационный магнитометр (слева) и блок-схема экспериментальной установки (справа) [22].

- |                     |  |
|---------------------|--|
| 1 - Электромагнит   | 7 - Генератор низкочастотных колебаний |
| 2 - Образец         | 8 - Усилитель                          |
| 3- Приемные катушки | 9 - Синхронный детектор                |
| 4 - Датчик Холла    | 10 - Персональный компьютер            |
| 5 - Термопара       |  |
| 6 - Вибратор        |  |

Принцип действия прибора основывается на измерении намагниченности образца, который колеблется в однородном магнитном поле. В основе данного метода лежит индукционный способ измерения магнитных свойств. Образец (2) совершает гармонические колебания, которые создаются генератором механических колебаний (вибратором) (6), на который подаётся напряжение от низкочастотного генератора (7). Переменный сигнал, амплитуда которого пропорциональна магнитному моменту исследуемого образца, усиливается в селективном усилителе (8), величина амплитуды определяется с помощью синхронного детектора (9), полученный сигнал оцифровывается и через интерфейсную систему подается в персональный компьютер (10). В

измерительной цепи находятся датчик измерения магнитного поля (датчик Холла (4)) и датчик измерения температуры (термопара (5)).

Измерения объёмных магнитных характеристик изучаемых  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  лент были выполнены при комнатной температуре. Образцы крепились с помощью фумленты к торцу штока. Внешнее магнитное поле,  $H$ , прикладывалось в плоскости лент: схематическое изображение взаимной ориентации распространения приложенного магнитного поля и осей ленты представлено на рисунке 8, где  $\theta$  - угол между осью ленты и направлением распространения  $H$ .



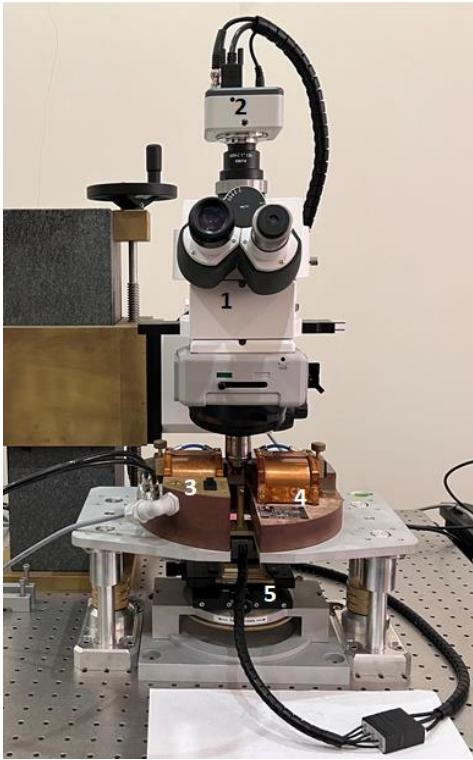
**Рис. 8** Схематическое изображение взаимной ориентации распространения  $H$  и осей ленты.

Нулевое положение угла поворота,  $\theta$  – это угол, при котором  $H$  было параллельно длинной стороне ленты. Шток вращался вокруг своей оси от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $10^\circ$ .

## 2.2. Магнитооптический метод исследования

Измерение приповерхностных петель гистерезиса и одновременная визуализация доменной структуры (ДС) в процессе перемагничивания  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  лент (регистрировались изменения компоненты намагниченности,  $M$ , под действием приложенного магнитного поля) были выполнены с помощью магнитооптического Керр-магнитометра при комнатной температуре только со свободной стороны ленты. Используемый Керр-магнитометр создан на основе поляризационного микроскопа Carl Zeiss (Производитель: Evico magnetics GmbH, Германия), представленного на рисунке 9 [23].

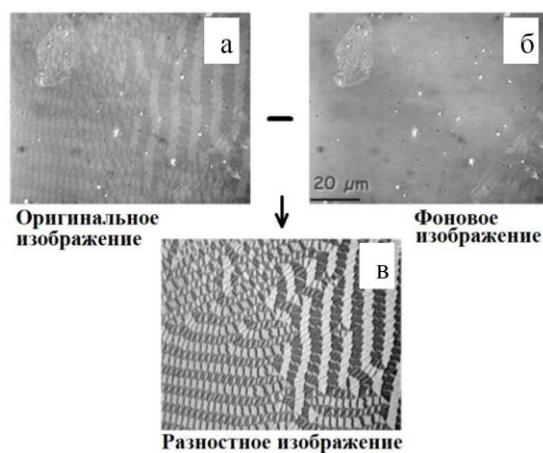




1. Оптический микроскоп с высоким разрешением
2. Камера
3. Электромагнит
4. Держатель магнита
5. Поворотный столик в XYZ направлениях

**Рис. 9** Магнитооптический Керр-магнитометр.

Принцип получения контрастного изображения с помощью выше описанного микроскопа состоит в следующем. Вначале регистрируется оригинальное изображение образца (Рис. 10 (а)). Наличие разных цветов контраста соответствует тому, что вектора намагниченности  $M$  в этих областях направлены в разные стороны. Обработка изображений требует усиления контраста. В связи с этим регистрируется изображение топографического контраста, то есть фоновое изображение образца, в магнитном поле, превышающем поле насыщения (Рис. 10 (б)). Компьютерная обработка этих данных позволяет получить разностное изображение, которое содержит только контраст доменов (Рис. 10 (в)).

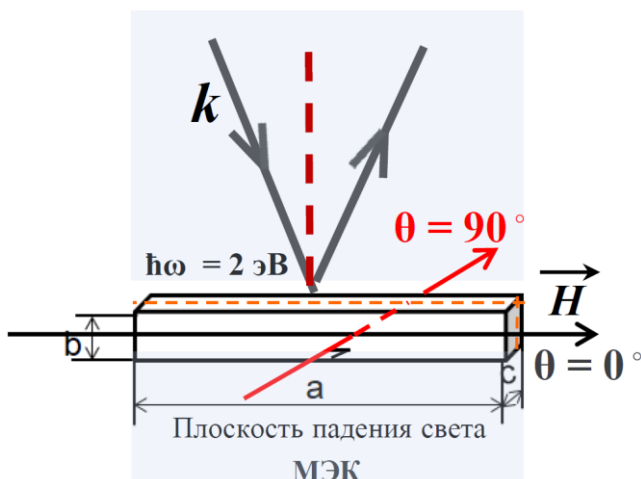


**Рис. 10** Иллюстрация принципа получения контрастного изображения характерной доменной структуры с помощью Керр-магнитометра [23].

Основные технические характеристики установки:

- линейные размеры области наблюдения 0.1-5.0 мм;
- размер области наблюдения дополнительного обзорного поляризационного микроскопа 8.0 – 30.0 мм;
- источник света – 8 высокостабильных светодиодов, длина волны 450.0 нм;
- цифровая фотокамера с разрешением 1344 x 1024 пкс.

Измерение петель гистерезиса и наблюдение ДС осуществлялось с помощью меридионального эффекта Керра (МЭК), пропорционального компоненте намагниченности, параллельной плоскости падения света. Схематическое изображение магнитооптических измерений представлено на рисунке 11.



**Рис. 11** Схематическое изображение магнитооптических измерений с помощью МЭК.

### 2.3. Метод атомно-силовой микроскопии для изучения морфологии поверхности образцов

Морфология поверхности образцов была исследована методом атомно-силовой (АСМ) микроскопии с использованием сканирующего зондового микроскопа SMENA-A, платформа “Solver” (NT-MDT, РФ, г. Зеленоград) (Рис. 12). Атомно-силовая микроскопия - вид зондовой микроскопии, основанный на силовом взаимодействии атомов. На расстоянии равном 0.1 нм

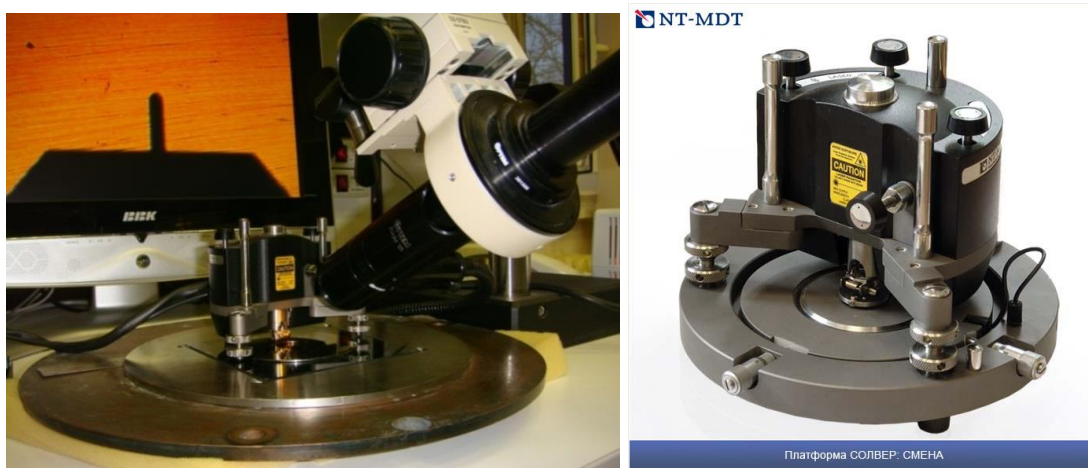
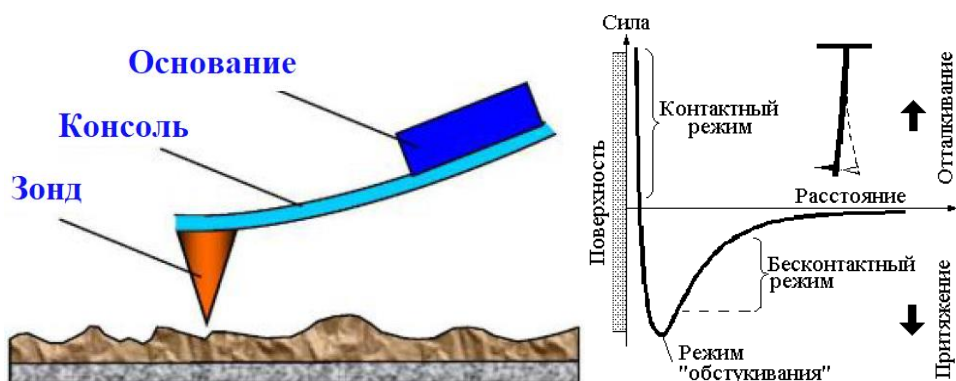


Рис. 12 Изображения атомного силового микроскопа SMENA-A.

между атомами образца и атомом зонда (кантилевера) возникают силы отталкивания в результате перекрытия их электронных оболочек и кулоновского отталкивания ядер (короткодействующие силы, возникающие на расстоянии порядка 0.1-1.0 нм), а на больших расстояниях – силы притяжения в результате действия ван-дер-ваальсовых сил между острием сканирующей иглы и образцом (расстояние между острием и образцом порядка 5.0-10.0 нм). Принцип устройства заключается в следующем - кантилевер, перемещаясь относительно поверхности и реагируя на силовое взаимодействие, регистрирует ее рельеф. Сила, действующая со стороны поверхности на зонд, приводит к изгибу консоли (Рис. 13).

Регистрируя величину изгиба, можно контролировать силу взаимодействия зонда с поверхностью [24]. В АСМ величина вертикальных смещений



**Рис. 13** Схематическое изображение зондового датчика АСМ (слева) и зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между острием и образцом (справа) [24].

кантилевера измеряется с помощью оптической системы регистрации и преобразуется в электрический сигнал.

Исследуемые  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{V}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  ленты исследовались в полуконтактной моде при комнатной температуре. При работе в этом режиме возбуждаются вынужденные колебания кантилевера вблизи резонанса с амплитудой порядка 10 – 100 нм. Кантилевер подводится к поверхности так, чтобы в нижнем полупериоде колебаний происходило касание поверхности образца. При сканировании образца регистрируется изменение амплитуды и фазы колебаний кантилевера. Взаимодействие кантилевера с поверхностью в "полуконтактном" режиме состоит из ван-дер-ваальсового взаимодействия, к которому в момент касания добавляется упругая сила, действующая на кантилевер со стороны поверхности.

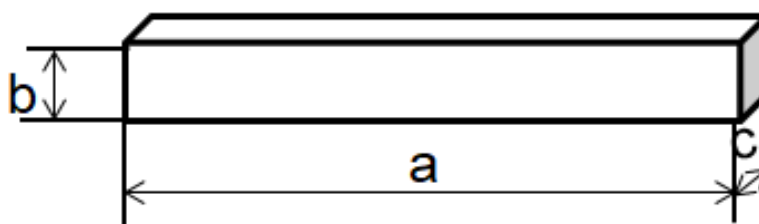
Основные характеристики установки:

использовались стандартные кремниевые кантилеверы MFM 01 с резонансными частотами от 47 до 90 кГц, радиусом закругления кончика иглы (tip) 40 нм, силовой константой 1-5 Н/м. Образцы сканировались в областях размером 4x4 мкм, 12x12 мкм и 30x30 мкм.

Полученные АСМ изображения были обработаны с использованием математических операций и фильтров программы «Nova», представленной изготовителями АСМ.

## 2.4. Изучаемые образцы

Изучаемые в данной работе аморфные ленты  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  были получены путём быстрой закалки из расплава. Исследовались две серии образцов: ленты отожжённые при температуре  $520^\circ\text{C}$  в течение 2 часов без нагрузки (релаксационный отжиг, FM-AN) и ленты, отожжённые при температуре  $520^\circ\text{C}$  в течение 2 часов под нагрузкой 150 МПа (FM-SA). Данная температура отжига была выбрана изготовителями лент, как наиболее оптимальная для получения образцов с наиболее выраженными магнитомягкими свойствами. В каждой серии (FM-AN и FM-SA) были изготовлены по две ленты разной ширины 0.88 мм (FM1 и FM4) и 0.60 мм (FM2 и FM3). Схематическое изображение исследуемых образцов представлено на рисунке 14, где  $a$  – длина,  $b$  – толщина и  $c$  – ширина.



**Рис. 14** Схематическое изображение исследуемых образцов.

Исследуемые образцы были отрезаны от исходных лент и имели практически прямоугольную форму. Длина образцов не превышала 4 мм, что было обусловлено техническими данными экспериментальной установки. Толщина лент была неизменна и составляла 20 мкм.

Геометрические параметры изучаемых лент были оценены по фотографиям, полученным на оптическом микроскопе, а также измерены с помощью электронного штангенциркуля.

Массы образцов,  $m$ , необходимые для последующего определения намагниченности, были определены с помощью высокоточных электронных весов непосредственно перед измерениями магнитных характеристик.

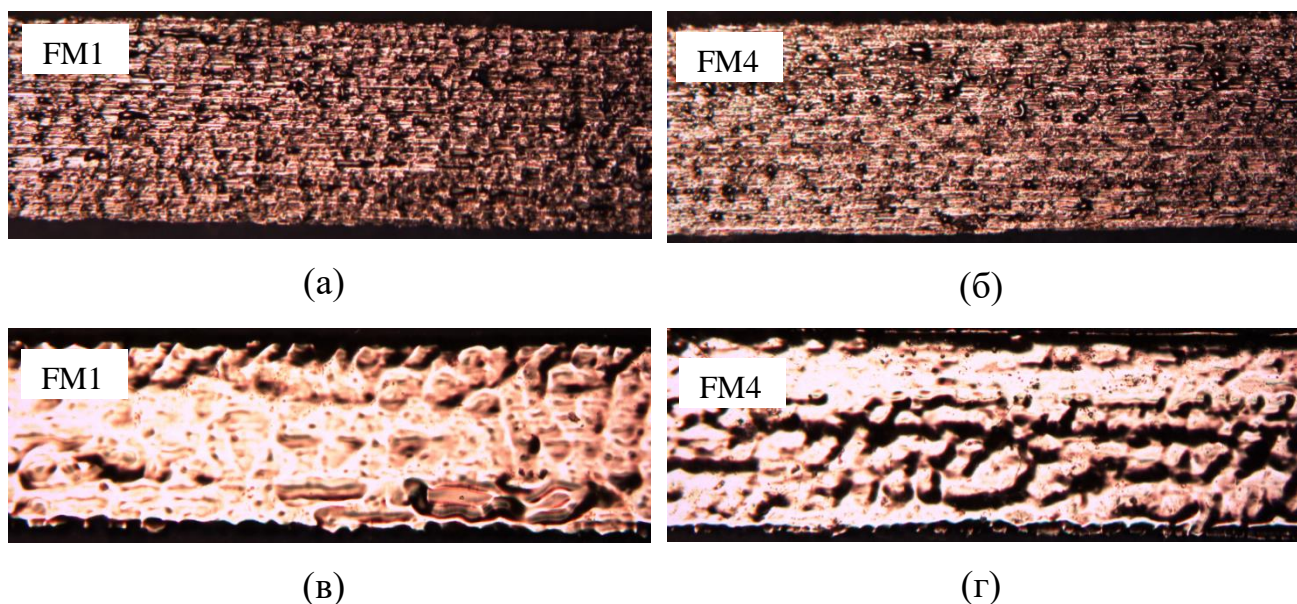
Изучаемые образцы были предоставлены проф., д.ф.-м.н. Курляндской Г.В. из Уральского Федерального Университета, Екатеринбург.



### ГЛАВА 3. Результаты исследования $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ лент

#### 3.1. Основные параметры $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ лент

Геометрические параметры изучаемых лент и предварительная оценка поверхности были оценены по фотографиям, полученным на оптическом микроскопе. Для примера на рисунке 15 показан общий вид поверхности с обеих сторон для лент, отожженных без нагрузки (FM1) и под нагрузкой (FM4). Видно, что изучаемые ленты имеют несимметричные поверхности и хорошо выраженную ширину. Контактная сторона имеет матовую поверхность. На ней присутствуют дефекты микронных размеров, ориентированные в направлении движения ленты. Свободная сторона имеет блестящую, более гладкую поверхность. Ширина образцов, оцененная по данным фотографиям, составляла  $0.88 \pm 0.22$  мм. Измерение длины, ширины и толщины лент было также проведено с помощью электронного штангенциркуля. На основе этих данных были определены значения объемов,  $V$ , в  $\text{см}^3$ . Массы образцов были измерены непосредственно перед измерением объемных магнитных характеристик. Все измеренные и рассчитанные данные приведены в таблице 2.



**Рис. 15** Общий вид поверхности лент FM1 и FM4 с контактной стороны (а и б) и со свободной стороны (в и г), полученные с помощью оптического микроскопа.

Таблица 2. Основные параметры изучаемых образцов.

	Обозначение	a, мм	b, мм	c, мм	m, г	V, см <sup>3</sup>
FM-AN	FM1	3.89	0.02	0.88	0.00034	6.85E-05
	FM2	3.67	0.02	0.60	0.00023	4.4E-05
FM-SA	FM3	3.93	0.02	0.60	0.00023	4.72E-05
	FM4	3.90	0.02	0.88	0.00029	6.86E-05

Измеренное значение ширины ленты хорошо согласуется в пределах погрешности с данными, полученными с помощью оптического микроскопа, приведенными выше.

### 3.2. Структурные свойства $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ лент

Микроструктура изучаемых  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  лент была исследована изготовителями образцов методом рентгеновской дифракции с использованием  $\text{CuK}\alpha$  излучения.

На рисунке 16 представлены результаты измерений рентгеновских спектров, полученных для фанмет лент AN и SA.

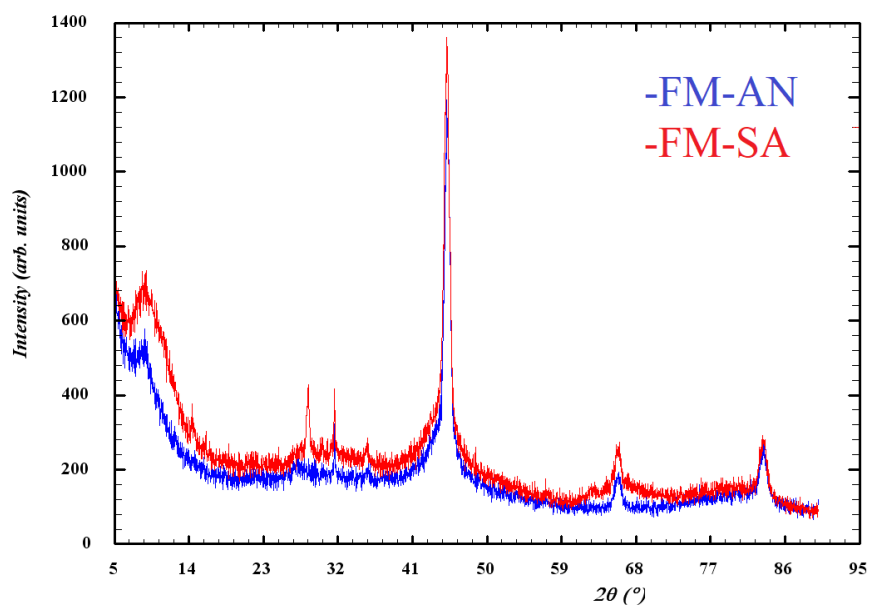
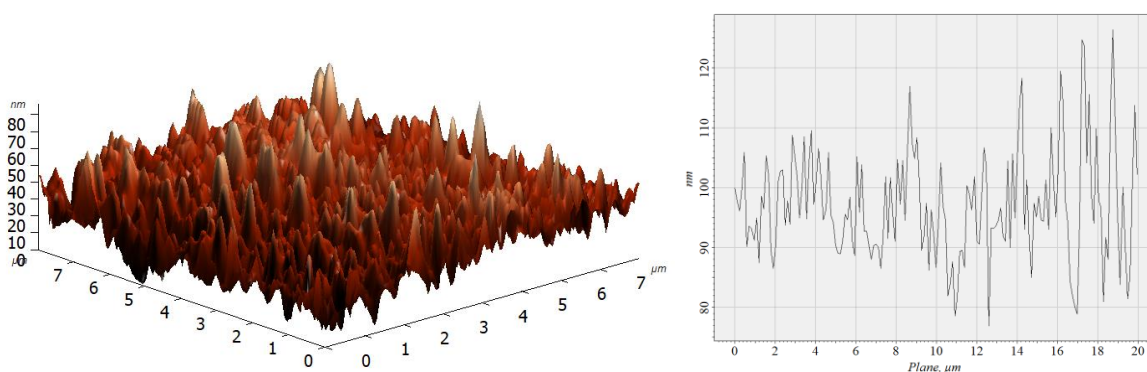


Рис. 16 Рентгеновские спектры, наблюдаемые для изучаемых образцов: синяя кривая – FM-AN, красная – FM-SA.

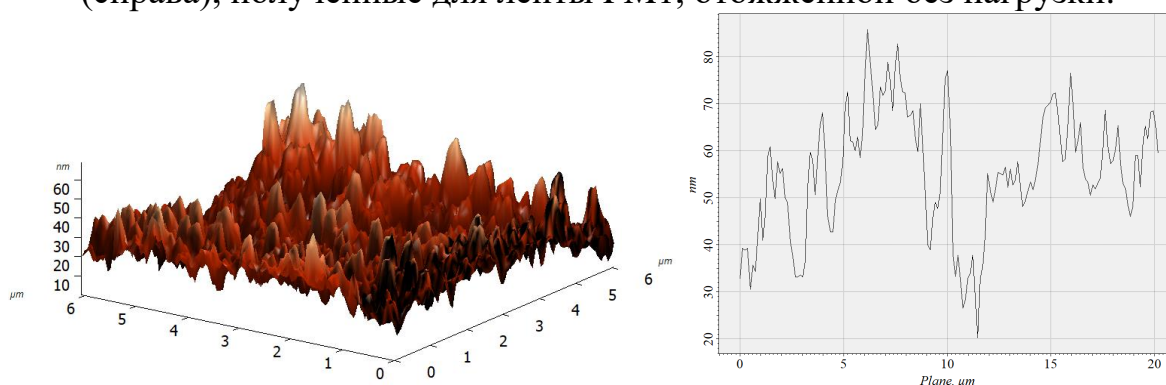
Данные исследований показали, что образцы имеют нанокристаллическую структуру с размером кристаллитов, рассчитанным по методу Шеррера, около 15 нм.

### 3.3. Морфология поверхности $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{V}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ образцов

Морфология поверхности  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{V}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  лент была изучена с помощью атомного силового микроскопа, описанного в главе 2.3. Наиболее характерные изображения и профили поверхности исследуемых образцов, отожжённых без нагрузки и под нагрузкой, представлены на рисунках 17-18. Анализ полученных данных показал, что средняя шероховатость поверхности образцов, отожжённых без нагрузки (FM-AN, Рис. 17), составляет порядка 100 нм, а для образцов, отожжённых под нагрузкой (FM-SA, Рис. 18) порядка 20 нм. То есть, средняя шероховатость поверхности образцов FM-SA, меньше, чем FM-AN и может отличаться на порядок. Таким образом, нагрузка во время отжига повышает качество исследуемой поверхности.



**Рис. 17** АСМ изображение поверхности (слева) и профиль поверхности (справа), полученные для ленты FM1, отожжённой без нагрузки.



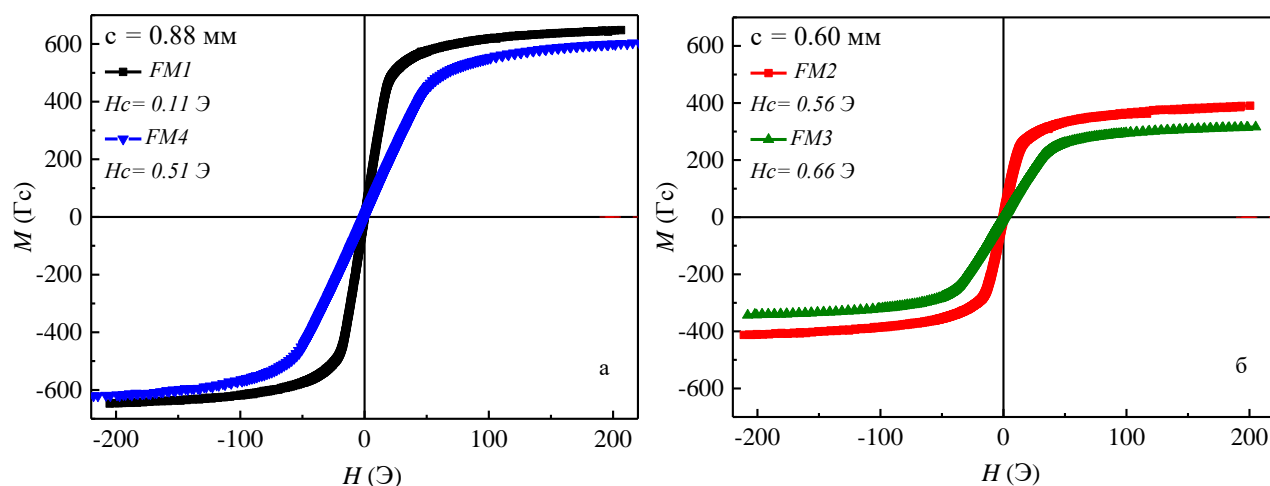
**Рис. 18** АСМ изображение поверхности (слева) и профиль поверхности (справа), полученные для ленты FM4, отожжённой под нагрузкой.



### 3.4. Магнитные свойства $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$ лент

Измерения объёмных магнитных характеристик  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  лент были выполнены на вибрационном магнитометре, подробно описанном в главе 2.1. Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном в плоскости лент, параллельно длинной стороне, с помощью ВСМ, для образцов разной ширины, представлены на рисунке 19. Для оценки значений  $M_S$  в Гс значения момента насыщения,  $m$ , измеряемые непосредственно во время эксперимента, делились на объем образца в  $\text{см}^3$ .

Данные рисунка 19 свидетельствуют о том, что петли практически безгистерезисные и характеризуются крайне малыми значениями  $H_C$ , что говорит о высокой степени магнитомягких свойств изучаемых лент. Сравнение петель гистерезиса, отожжённых без нагрузки (черная и красная кривые) и под нагрузкой (синяя и зеленая кривые) для различной ширины лент, показывает, что отжиг под нагрузкой влияет на магнитополевое поведение лент.

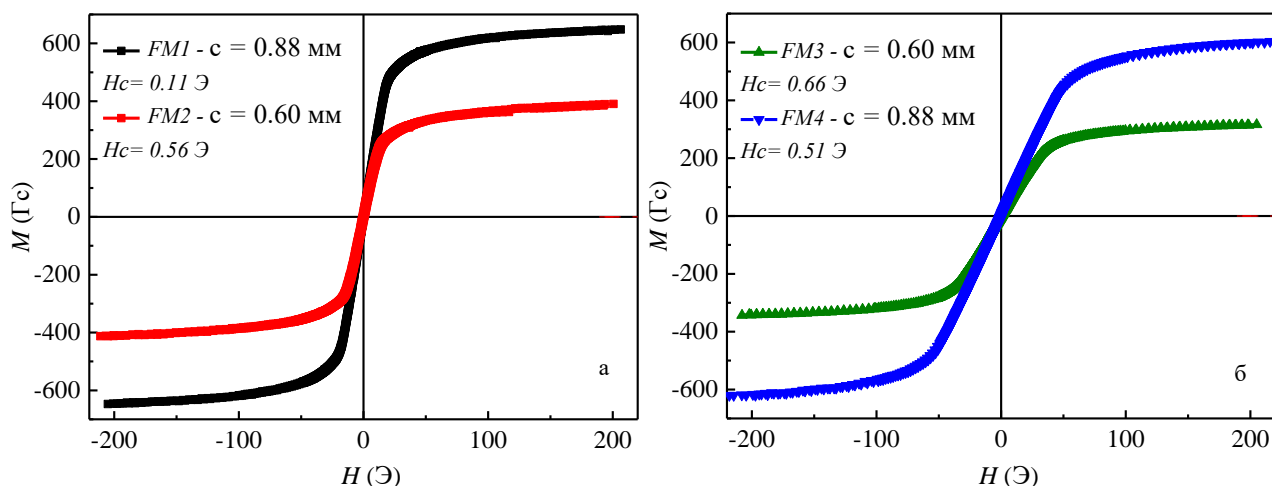


**Рис. 19** Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном в плоскости лент, параллельно длинной стороне, с помощью ВСМ.

Петли гистерезиса становятся более наклонными (синяя и зеленая кривые), независимо от ширины ленты. Это говорит о затруднении процессов перемагничивания вдоль ленты, что является результатом наведения поперечной магнитной анизотропии. Основной причиной появления анизотропии после отжига под нагрузкой является остаточная деформация

решетки нанокристаллов [25]. Данный факт наблюдался также ранее в работах [25] и [3]. Анализ полученных результатов показал, что для образцов, отожжённых под нагрузкой, снижается значение намагниченности насыщения  $M_S$ : для образцов шириной 0.88 мм (Рис. 19 (а)) снижение составляет порядка 10%, для образцов шириной 0.60 мм (Рис. 19 (б)) - порядка 20%. Кроме того, наблюдается увеличение значений коэрцитивной силы  $H_C$ : для образцов шириной 0.88 мм (Рис. 19 (а)) в 4.5 раза, для образцов шириной 0.60 мм (Рис. 19 (б)) в 1.2 раза. Возможной причиной увеличения  $H_C$  может быть увеличение содержания Cr до 5 % , что приводит к появлению фаз  $Fe_2V$  и Cr при резком увеличении шероховатости поверхности [21]. Кроме того, при отжиге под нагрузкой наблюдается рост значений поля насыщения  $H_S$  примерно в 1.2 раза независимо от ширины лент. Следует отметить, что значения  $H_S$  определялись как значения приложенного магнитного поля, при котором намагниченность образца достигает 98% намагниченности насыщения,  $M_S$ .

Кроме того, данные рисунка 19 показали, что ширина ленты также оказывает влияние на магнитные свойства образцов. Для наглядности представим на рисунке 20 данные для лент различной ширины, отожжённых без нагрузки, FM-AN (Рис. 20 (а)), и под нагрузкой, FM-SA (Рис. 20 (б)).

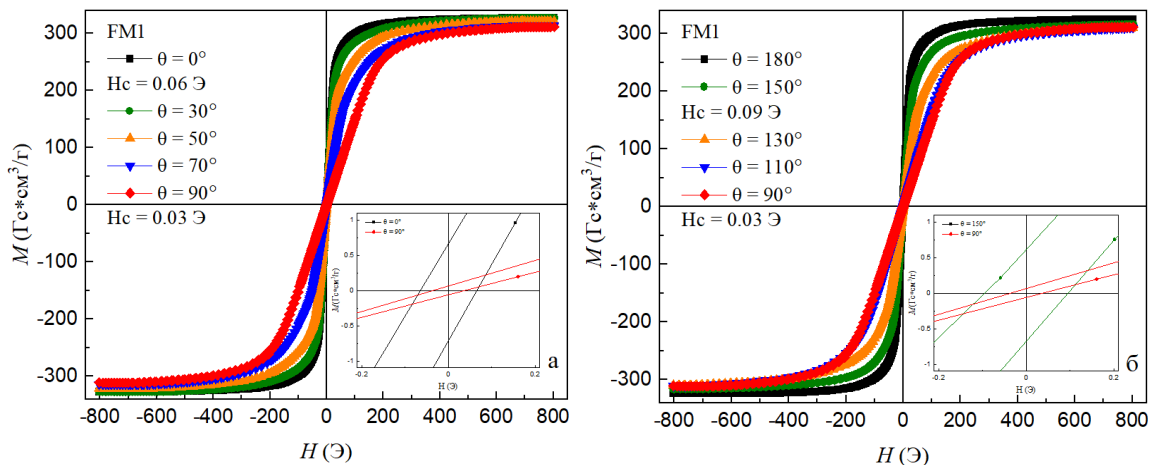


**Рис. 20** Петли гистерезиса для FM-AN (а) и для FM-SA (б), измеренные в магнитном поле, приложенном в плоскости лент, параллельно длинной стороне, с помощью VSM.

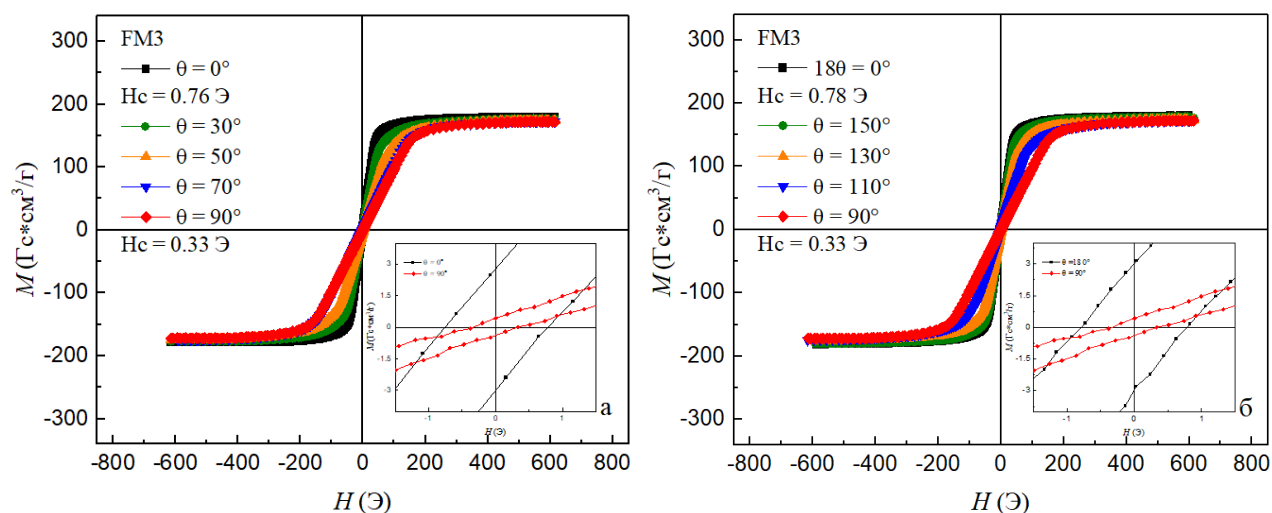
Видно, что с уменьшением ширины образца намагниченность  $M$  значительно уменьшается: для FM-AN (Рис. 20 (а)) в 1.5 раза, для FM-SA (Рис. 20 (б)) в 2 раза. При этом петли имеют схожую форму. Также видно, что с уменьшением ширины увеличиваются значения  $H_C$ : для FM-AN (Рис. 20 (а)) в 5 раз, для FM-SA (Рис. 20 (б)) в 1.3 раза. Значения  $H_S$  практически не изменяются, отличие составляет порядка 10%.

Было решено провести более подробный анализ для лент с различной шириной, отожжённых без нагрузки (FM1,  $c = 0.88$  мм) и под нагрузкой (FM3,  $c = 0.60$  мм), чтобы наравне с влиянием отжига под нагрузкой оценить влияние ширины ленты на магнитные характеристики.

Как было сказано выше в главе 2.1, измерение объемных магнитных характеристик в плоскости лент было проведено при углах  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  с шагом  $10^\circ$ . Наиболее характерные петли гистерезиса для лент, отожженных без нагрузки (FM1) и с нагрузкой (FM3), для углов поворота  $\theta$  от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  представлены на рисунках 21 и 22.



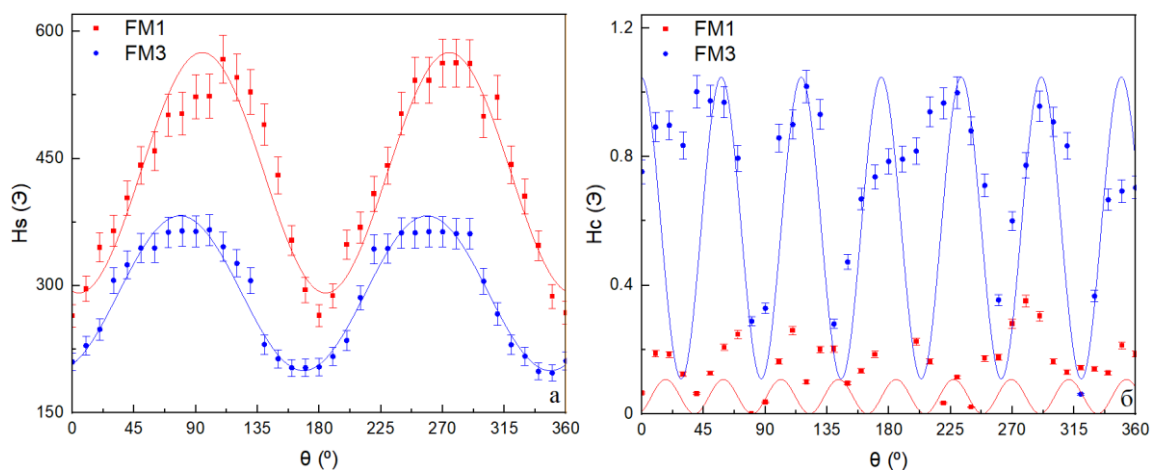
**Рис. 21** Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном в плоскости ленты FM1 с толщиной  $c = 0.88$  мм для углов поворота а) от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  и б) от  $90^\circ$  до  $180^\circ$  с помощью ВСМ.



**Рис. 22** Петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном в плоскости ленты FM3 с толщиной  $s = 0.60$  мм для углов поворота а) от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  и б) от  $90^\circ$  до  $180^\circ$  с помощью ВСМ.

Из полученных экспериментальных данных видно, что магнитополевое поведение образцов зависит от угла поворота для обеих серий. А именно, при  $\theta = 0^\circ$  наблюдаются прямоугольные петли, что характерно для оси лёгкого намагничивания (ОЛН), а при  $\theta = 90^\circ$  наблюдаются наклонные петли, что характерно для оси трудного намагничивания (ОТН). Также, полученные петли практически безгистерезисные и характеризуются крайне малыми значениями коэрцитивной силы  $H_C$ .

Измеренные петли гистерезиса позволили получить зависимости значений  $H_S$  и  $H_C$  от углов поворота,  $\theta$ , для лент FM1 и FM3, представленные на рисунке 23.



**Рис. 23** Зависимости а) поля насыщения  $H_S$  и б) коэрцитивной силы  $H_C$  от углов поворота  $\theta$  для лент FM1 и FM3.

Данные рисунка 23 свидетельствуют о влиянии угла поворота на магнитные характеристики образцов. Осциллирующая зависимость  $H_S(\theta)$  подтверждает наличие одноосной магнитной анизотропии.

Полученные экспериментальные данные позволили рассчитать значения размагничивающего фактора  $N$  (см. раздел 1.4.3),  $\Delta$  и константы наведенной магнитной анизотропии,  $K_u$  (см. раздел 1.4.2) для исследуемых лент. Основные магнитные характеристики образцов, а также рассчитанные константы представлены ниже в таблице 3.

Таблица 3. Основные магнитные характеристики образцов, рассчитанные из экспериментальных данных, полученных с помощью ВСМ при  $\theta=0^\circ$ .

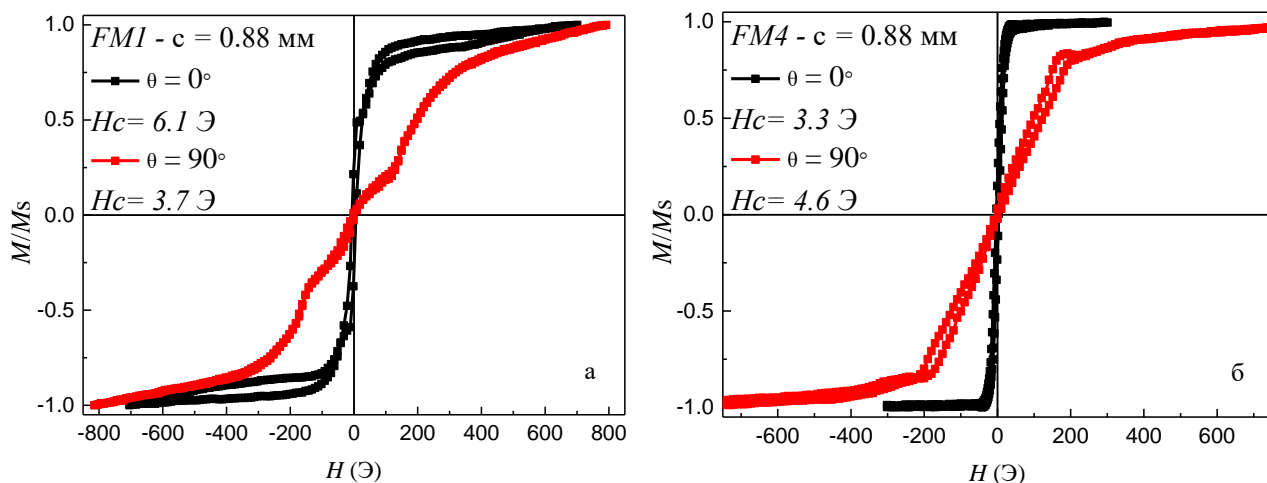
	Обозначение	$c$ , мм	$N$	$M_S$ , Гс	$H_C$ , Э	$H_S$ , Э	$H_a$ , Э	$-\Delta$ , Дж/м <sup>3</sup>	$K_u$ , Дж/м <sup>3</sup>
FM-	FM1	0.88	0.010	640	0.11	100	25	770	-
AN	FM2	0.60	0.013	380	0.56	100	20	340	-
FM-	FM3	0.60	0.012	310	0.66	120	40	650	<b>310</b>
SA	FM4	0.88	0.012	590	0.51	130	60	1700	<b>930</b>

Было обнаружено, что для образцов, отождённых под нагрузкой, при уменьшении ширины ленты значение  $K_u$  уменьшается в 3 раза и по порядку величины сопоставимы с литературными данными.

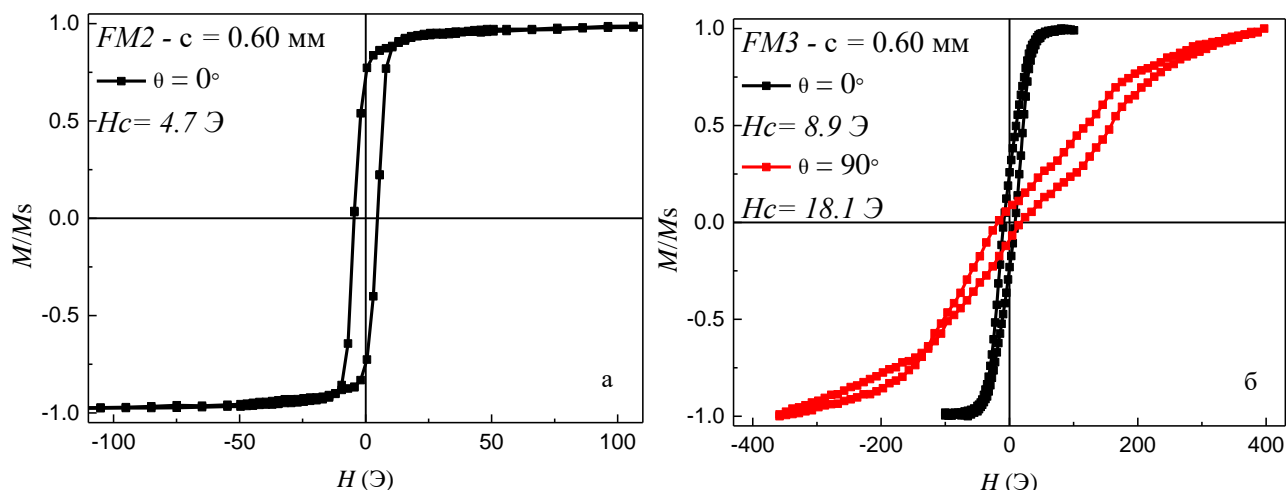
### 3.5. Магнитооптические свойства $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$ образцов

Измерения приповерхностных магнитных характеристик и визуализация доменной структуры (ДС)  $Fe_{68.5}Cr_5Si_{13.5}B_9Nb_3Cu_1$  лент были выполнены на магнитооптическом (МО) Керр-магнитометре, подробно описанном в главе 2.2, со свободной стороны лент. Типичные приповерхностные петли гистерезиса

изучаемых лент, измеренных при углах  $\theta$ , равных  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , отожжённых без нагрузки и под нагрузкой приведены соответственно на рисунках 24 и 25.



**Рис. 24** Приповерхностные петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном в плоскости лент, отожжённых без нагрузки (FM1) и под нагрузкой (FM4) с толщиной  $c = 0.88$  мм с помощью МО Керр-магнитометра.



**Рис. 25** Приповерхностные петли гистерезиса, измеренные в магнитном поле, приложенном в плоскости лент, отожжённых без нагрузки (FM2) и под нагрузкой (FM3) с толщиной  $c = 0.60$  мм с помощью МО Керр-магнитометра.

Данные рисунков 24 и 25 свидетельствуют о том, что отжиг под нагрузкой влияет на магнитное поведение образцов: форма петель гистерезиса для образца, отожжённого под нагрузкой (Рис. 24(б)), отличается от формы петель образца, отожжённого без нагрузки (Рис. 24(а)).

Кроме того, следует отметить, что приповерхностные петли гистерезиса имеют более сложную форму, по сравнению с объёмными петлями, приведенными выше. Для лент FM1 (Рис. 24(а)) и FM4 (Рис. 24(б)) перемагничивание лент при  $\theta=90^\circ$  идёт в два этапа.

По данным рисунков 25 (б) и 24 (б) видно, как и при измерениях объёмных магнитных характеристик, что с уменьшением ширины ленты, отожжённой под нагрузкой, увеличиваются значения  $H_C$  в 2.7 раза. В то же время для образца, отожжённого без нагрузки (Рис. 25 (а)), наблюдается уменьшение значений  $H_C$  в 1.3 раза.

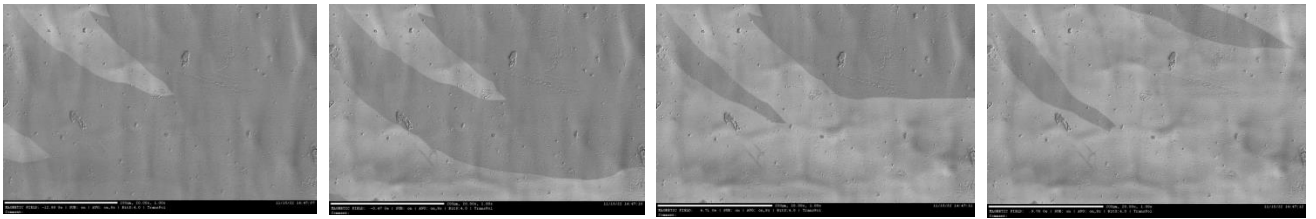
Основные магнитные характеристики образцов, а также рассчитанные константы представлены ниже в таблице 4.

Таблица 4. Основные магнитные характеристики образцов, рассчитанные из экспериментальных данных, полученных с помощью МО Керр-магнитометра при  $\theta=0^\circ$ .

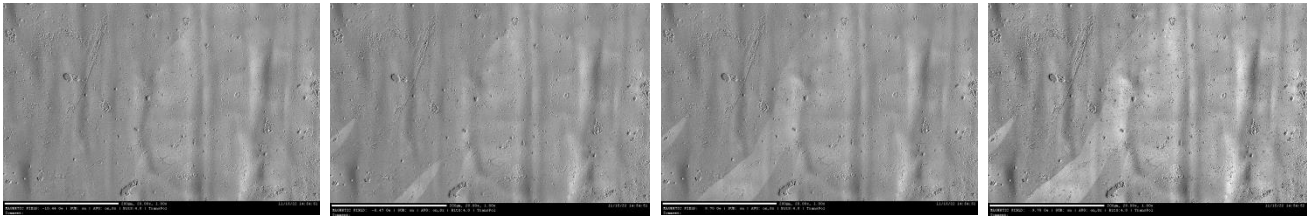
		с, мм	$N$	$H_C$ , Э
FM-AN	FM1	0.88	0.010	6.1
	FM2	0.60	0.013	4.7
FM-SA	FM3	0.60	0.012	8.9
	FM4	0.88	0.012	3.3

Сравнение значений коэрцитивной силы  $H_C$ , приведенных в таблицах 3 и 4 показывает: что приповерхностные значения на порядок больше, чем объёмные. Этот факт может быть объяснен наличием микроструктурных и химических неоднородностей в приповерхностных слоях образцов, что является характерным для материалов, приготовленных описанным методом закалки из расплава [26].

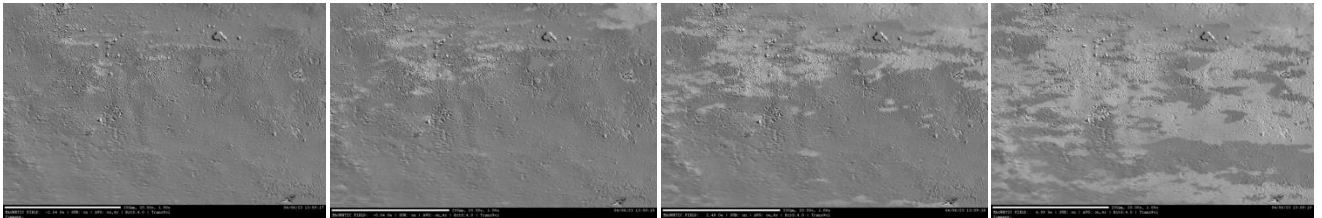
Также были получены изображения доменной структуры. Типичные видоизменения ДС изучаемых лент представлены на рисунках 26-33.



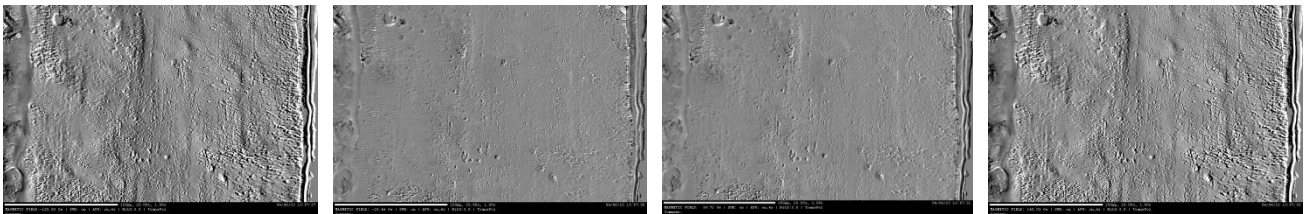
**Рис. 26** Видоизменение доменной структуры ленты FM1 в области полей от -10 до 10 Э при  $\theta=0^\circ$ .



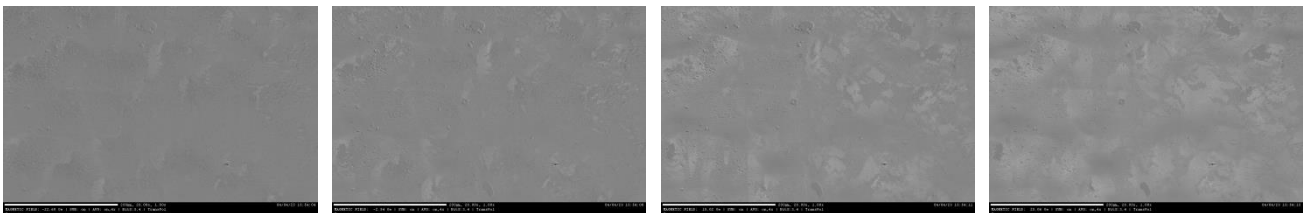
**Рис. 27** Видоизменение доменной структуры ленты FM1 в области полей от -10 до 10 Э при  $\theta=90^\circ$ .



**Рис. 28** Видоизменение доменной структуры ленты FM2 в области полей от -5 до 5 Э при  $\theta=0^\circ$ .

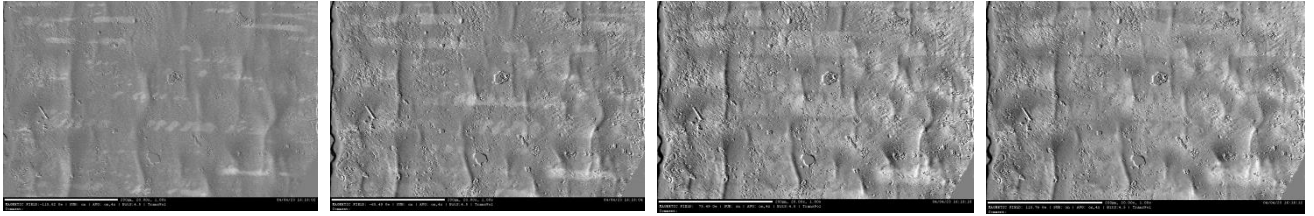


**Рис. 29** Видоизменение доменной структуры ленты FM2 в области полей от -130 до 130 Э при  $\theta=90^\circ$ .

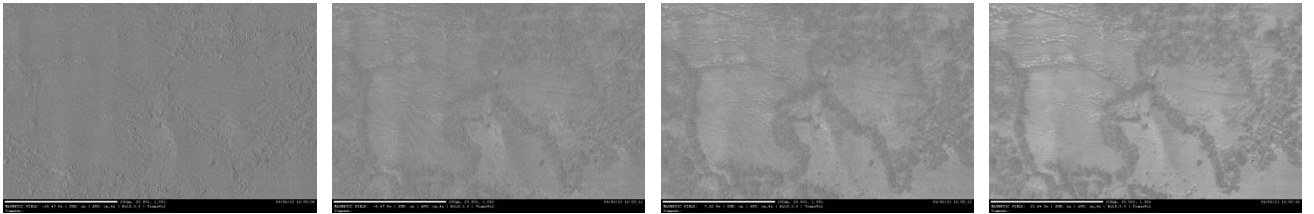


**Рис. 30** Видоизменение доменной структуры ленты FM3 в области полей от -20 до 20 Э при  $\theta=0^\circ$ .

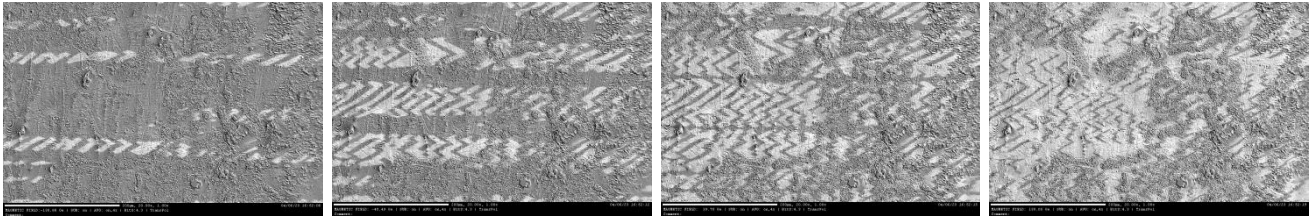




**Рис. 31** Видоизменение доменной структуры ленты FM3 в области полей от -115 до 115 Э при  $\theta=90^\circ$ .



**Рис. 32** Видоизменение доменной структуры ленты FM4 в области полей от -20 до 20 Э при  $\theta=0^\circ$ .

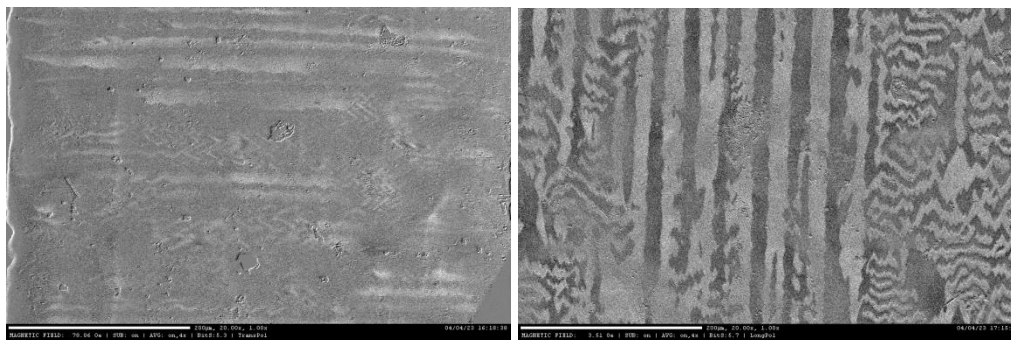


**Рис. 33** Видоизменение доменной структуры ленты FM4 в области полей от -130 до 130 Э при  $\theta=90^\circ$ .

Видно, что как для образцов, отожжённых без нагрузки, так и для образцов, отожжённых под нагрузкой, наблюдается хаотичное распределение намагниченности, зависящее от  $\theta$ .

Данные показывают, что для образцов, отожжённых без нагрузки (FM1 и FM2) наблюдаются широкие домены с доменными стенками  $180^\circ$ , что является типичным для мягких ферромагнитных материалов с одноосной магнитной анизотропией [3]. Для образцов, отожжённых под нагрузкой (FM3 и FM4) наблюдается зигзагообразная доменная структура. Наблюдаемые структуры доменов согласуются с характеристиками петель гистерезиса, рассмотренными ранее.

Для образца FM3, отожжённого под нагрузкой, (рисунок 34) наблюдается одновременно полосовая и зигзагообразная доменная структура, что возможно является подтверждением эвтектической кристаллизации.



**Рис. 34** Доменная структура FM3 в области полей 0 Э.

### **Основные результаты и выводы**

В результате проведенного исследования получена информация о морфологии поверхности, структурных и магнитных свойствах  $\text{Fe}_{68.5}\text{Cr}_5\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$  лент.

1. Исследуемые ленты имеют несимметричные поверхности и хорошо выраженную ширину.
2. Изучаемые образцы имеют нанокристаллическую структуру с размером зерна около 15 нм.
3. Нагрузка во время отжига приводит к уменьшению шероховатости поверхности.
4. Нагрузка при отжиге приводит к наведению поперечной магнитной анизотропии. Основной причиной этого является остаточная деформация решетки нанокристаллов.
5. Нагрузка во время отжига влияет на магнитные характеристики лент: увеличиваются значения  $H_C$  и  $H_S$ , уменьшается  $M_S$ .
6. Ширина ленты влияет на магнитные характеристики: с её уменьшением уменьшается  $M_S$ , увеличивается  $H_C$ .

7. Магнитное поведение образцов зависит от угла поворота: при  $\theta = 0^\circ$  - прямоугольные петли гистерезиса (ОЛН), при  $\theta = 90^\circ$  - наклонные (ОТН). Этот факт подтверждает наличие одноосной магнитной анизотропии.
8. Осциллирующая зависимость  $H_S(\theta)$  подтверждает наличие одноосной магнитной анизотропии.
9. При уменьшении ширины ленты значения константы анизотропии  $K_u$  уменьшается в 3 раза и по порядку величины сопоставимы с литературными данными.
10. Приповерхностные петли гистерезиса имеют более сложную форму. Перемагничивание ленты при  $\theta=90^\circ$  идёт в два этапа.
11. Приповерхностные значения  $H_C$  увеличиваются с уменьшением ширины лент, а также на порядок больше, чем объёмные значения.
12. Наблюдается хаотичное распределение намагниченности, зависящее от  $\theta$ .
13. Образцы, отожжённые без нагрузки имеют широкие домены с доменными стенками  $180^\circ$ , что является типичным для мягких ферромагнитных материалов с одноосной магнитной анизотропией. Образцы, отожжённые под нагрузкой, имеют одновременно зигзагообразную и полосовую доменную структуру, что говорит об эвтектической кристаллизации.

## Список литературы

1. Kurlyandskaya G.V., Lukshina V.A., Larrañaga A., Orue I., Zaharova A.A., Shishkin D.A. Induced magnetic anisotropy features in FeCrSiBNbCu nanocrystalline alloy: Role of stress distribution proven by direct X-ray measurements // *Journal of Alloys and Compounds* 566, 2013, p. 31–36.
2. Ершов Н.В., Лукшина В.А., Федоров В.И., Дмитриева Н.В., Черненко Ю.П., Потапов А.П. Влияние термомагнитной и термомеханической обработки на магнитные свойства и структуру магнитомягкого нанокристаллического сплава Fe<sub>81</sub>Si<sub>6</sub>Nb<sub>3</sub>V<sub>9</sub>Cu<sub>1</sub>// *ФТТ*, 2013, №55(3), т. 55, с. 460-470.
3. Kurlyandskaya G.V., Lezama L., Pasyukova A.A., Volchkov S.O., Lukshina V.A., Larrañaga A., Dmitrieva N.V., Timofeeva A.V., Orue I. Amorphous FeCoCrSiB Ribbons with Tailored Anisotropy for the Development of Magnetic Elements for High Frequency Applications// *Materials* 2022, 15(12), 4160
4. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. — М.: «Металлургия», 1987. — 328 с.
5. Аморфные металлические сплавы. / под ред. Ф.Е. Люборского. М.: *Металлургия*, 1987. 584 С.
6. Кёстер У., Герольд У. Кристаллизация металлических стекол // *Металлические стекла: в 2-х т. Ионная структура, электронный перенос и кристаллизация* / под ред. Г.-Й. Гюнтеродта, Г. Бека. М.: Мир, 1983. С. 325–371.
7. Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Пирайнен В.Ю. Специальные материалы в машиностроении. // *Химиздат*, 2004 г.
8. P. Vavassori, L. Callegaro, E. Puppini, F. Malizia, F. Ronconi, Surface magnetic characterization of Fe-B amorphous ribbons, *J. Magn. Mater.* 157/158 (1996) 171-172.
9. J.P. Sinnecker, R. Grossinger, R. Sato Turtelli, Quenched-in stresses in amorphous ribbons, *J. Magn. Mater.* 133 (1994) 20-23.
10. Greer A.L. Changes in structure and properties associated with the transition from the amorphous to the nanocrystalline state. // *Nanostructured Materials.* / под

ред. G.-M. Chow, N.I. Noskova. Netherlands: Springer, 1998. С. 143–162.

11. G. Herzer Nanocrystalline soft magnetic materials // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 112 (1992) 258-622

12. Hono K. и др. Atom probe study of the crystallization process of an Fe<sub>73.5</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub> amorphous alloy // *Appl. Surf. Sci.* 1993. Т. 67. № 1–4. С. 398–406.

13. Ершов Н.В, Черненко Ю.П., Лукшина В.А., Смирнов О.П., Шишкин Д.А. Влияние температуры продолжительного отжига на структуру и магнитные свойства нанокристаллического сплава FeSiNbCuB // *Физика твердого тела*, 2021, том 63, вып. 7. с.834-847.

14. Lotfollahi Z., García-Arribas A., Amirabadizadeh A., Orue I., Kurllyandskaya G.V. Comparative study of magnetic and magnetoimpedance properties of CoFeSiB-based amorphous ribbons of the same geometry with Mo or W additions // *Journal of Alloys and Compounds* 693 (2017) 767-776.

15. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений // М: Изд-во Моск. ун-та — 1985.— С. 1–336.

16. Вонсовский С.В. Магнетизм. М., Наука, 1971, с.778-780, 918.

17. Ершов Н.В., Федоров В.И., Черненко Ю.П., Лукшина В.А., Шишкин Д.А. Влияние кристаллизующего отжига под нагрузкой на магнитные свойства и структуру магнитомягкого сплава FeSiNbCuB, легированного хромом // *Физика твердого тела*, 2017, том 59, вып. 9, с.1724-1737.

18. Chen, D.-X.; Pardo, E.; Sanchez, A. Demagnetizing factors for rectangular prisms // *IEEE Trans. Magn.* 2005, 41, 2077–2088.

19. F.F. Marzo, A. Altube, A.R. Pierna A comparative study, by EIS and Tafel experiments, of the electrochemical behavior of FINEMET alloys modified with chromium // *Electrochimica Acta* 47, 2265 (2002).

20. N. Chau, P.Q. Thanh, N.Q. Hoa The existence of giant magnetocaloric effect and laminar structure in Fe<sub>73.5-x</sub>Cr<sub>x</sub> Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub> // *JMMM* 304, 36 (2006)

21. S.O. Volchkov, V.A. Lukshina, A.A. Zakharova, A.P. Potapov, E.G. Volkova Structure, Magnetic Properties, and Magnetoimpedance of the

Fe<sub>73.5-x</sub>Cr<sub>x</sub>Si<sub>13.5</sub>B<sub>9</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>1</sub> (x = 0 to 5) Alloys // IEEE Transactions on Magnetism, V. 50, Issue: 11, November 2014.

22. Перов Н.С., Родионова В.В., Прудникова М.В., Грановский А.Б., Прудников В.Н. Вибрационный магнитометр. Специальный физический практикум // Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. — 2016.— С. 1–32

23. Evico magnetics company User instruction for evico magnetics combined overview/high-resolution Kerr Microscope & Magnetometer // — P. 1–57.

24. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии // Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. РАН. Институт физики микроструктур.— 2004.— P. 1–110.

25. N.V. Ershov, Yu.P. Chernenkov, V.I. Fedorov, V.A. Lukshina, N.M. Kleinerman, V.V. Serikov, A.P. Potapov, N.K. Yurchenko Structure of Nanocrystals in Finemets with Different Silicon Content and Stress-Induced Magnetic Anisotropy // Nanocrystal. InTech, Rijeka (2011). P. 415–436.

26. Шалыгина Е.Е., Молоканов В.В, Комарова М.А., Магнитооптическое исследование микромагнитной структуры и процессов намагничивания Co<sub>69</sub>Fe<sub>4</sub>Si<sub>12</sub>B<sub>15</sub> аморфных микропроволок// ЖЭТФ — 2002— Т. 122, N. 3(9) — С. 593-599.

## Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю к.ф.-м.н. Харламовой Анне Михайловне за помощь с выбором темы научной работы, непрерывное обучение и помощь в проведении экспериментальных исследований, проявленное внимание, терпение и поддержку при написании бакалаврской работы.

Автор выражает благодарность профессору Курляндской Галине Владимировне Уральского Федерального Университета за предоставленные для исследования образцы, помощь в проведении рентгеноструктурных исследований, а также ценные консультации.

Автор выражает признательность за помощь в проведении магнитооптических измерений инженера кафедры магнетизма Перову Наталью Николаевну. А также благодарит к.ф.-м.н. Алехину Юлию Александровну за помощь в проведении экспериментальных измерений, всестороннюю поддержку и помощь.

Автор благодарит за ценные научные консультации и полезные замечания: профессора, заведующего кафедрой магнетизма Перова Николая Сергеевича.

Автор выражает благодарность к.т.н., доценту кафедры общей физики физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова Каминской Татьяне Петровне за помощь в проведении исследований на атомном силовом микроскопе.