

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА МАГНЕТИЗМА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Магнитные свойства бинарных сплавов на основе железа в широком
диапазоне температур»

Выполнил студент 219М группы:

Шапоров Артемий Валерьевич

Научный руководитель:

Профессор Перов Николай Сергеевич

Допущена к защите мая 2019 года

Зав. кафедрой магнетизма

Профессор Перов Н.С.

Москва

2019

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Литературный обзор.....	6
1.1 Основные отличительные характеристики Галфенолов.....	6
1.2 Структура Галфенолов и магнитные свойства.....	7
1.3 Механические свойства	14
1.6 Транспортные свойства Галфенолов.....	22
Глава 2. Методика измерений и описание образцов.....	23
2.1 Получение экспериментальных образцов Fe-Ga.....	23
2.3 Методика измерений полевых зависимостей магнитосопротивления.....	26
2.4 Методика измерений температурных зависимостей магнитосопротивления.....	27
2.5 Методика измерений магнитострикции.....	29
Глава 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение.....	30
3.1 Результаты измерений зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля.....	30
3.2 Результаты измерений зависимости намагниченности образца от температуры.....	32
3.4 Результаты измерений полевых транспортных свойств.....	36
3.5 Результаты измерений температурных транспортных свойств.....	39
Основные результаты работы и выводы:.....	43
Список Литературы.....	45

Введение.

Изучение новых магнитных сплавов и материалов является одним из основных направлений научной деятельности в экспериментальной физике магнитных явлений. Бинарные сплавы железа известны более 100 лет, однако их свойства все ещё не изучены в достаточной степени. С появлением новых экспериментальных методов научный интерес в изучении ферромагнитных сплавов возрос. Сплав железо-галлий, или, как его принято называть, Галфенол, стал центром научного внимания вследствие гигантской магнитострикции, которая в достаточно малых магнитных полях достигает 400 миллионных долей. [1]

В настоящее время основным магнитострикционным материалом в промышленности и производстве является Terfenol-D ($Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ ($x \sim 0.3$)) для которого показатели магнитострикции уже порядка 1000 миллионных долей. Однако, в его состав входят тербий и диспрозий – два редкоземельных металла, добыча и обработка которых является вредным производством, что сильно увеличивает его себестоимость. Помимо себестоимости, механические свойства такого сплава, а именно, высокая хрупкость и неустойчивость к ударным и растягивающим нагрузкам, усложняют производство и работу с ним. Механические же свойства Галфенолов характеризуются высоким модулем упругости (~ 65 ГПа) и пределом прочности (~ 515 МПа). [2] Эти сплавы легко обрабатываются, позволяют получать изделия различной формы. Все эти свойства дают потенциал для использования галфенолов в датчиках, исполнительных механизмах, в качестве поглотителей механической энергии. [3] Чтобы начать использовать материал в готовом изделии требуется полное исследование возможностей его применения в различных условиях окружающей среды (температура, давление и прочие).

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является изучение поведения транспортных свойств образцов железа-галлия с различной концентрацией в широком диапазоне температур.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в работе результатов обеспечена применением высокочувствительных экспериментальных методик на современном экспериментальном оборудовании с применениями статистических методов сбора, усреднения и детального анализа полученных результатов. Для каждого экспериментального результата обеспечивалась его повторяемость.

Практическая значимость работы

Полученные в работе результаты дают информацию о транспортных свойствах галфенолов в широком диапазоне температур, структурных и магнитных характеристиках, а также способствуют пониманию механизма перестроений кристаллографических структур в галфенолах с целью получения высоких значений константы магнитострикции, что дает возможность использования материала в прикладных целях.

Научная новизна работы

Научная новизна работы обусловлена получением новых данных о поведении намагниченности и электрического сопротивления образцов галфенола $\text{Fe}_{83}\text{-Ga}_{27}$ и $\text{Fe}_{75.2}\text{-Ga}_{24.8}$ в зависимости от внешнего магнитного поля и температуры. Полученные результаты могут быть сопоставлены с ранее известными данными для более детального понимания типов магнитного и кристаллического упорядочения в галфеноле, а также о механизмах их изменения.

Личный вклад автора

Все экспериментальные результаты, представленные в работе, были получены и обработаны лично автором. Для получения температурных характеристик транспортных свойств автор провел полный цикл работ по подготовке необходимого для измерений экспериментального оборудования и программного обеспечения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости удельного электрического сопротивления от внешнего магнитного поля образцов галфенола $Fe_{73}-Ga_{27}$ и $Fe_{75.2}-Ga_{24.8}$ носят линейный характер. Значение анизотропного магнитосопротивления 0.38% и 0.33%, соответственно.
2. Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры при напряженности внешнего магнитного поля 200 Э и при нулевой напряженности магнитного поля для образцов галфенола $Fe_{73}-Ga_{27}$ и $Fe_{75.2}-Ga_{24.8}$ является нелинейной в области температур выше 450°C.
3. Зависимость намагниченности от температуры для образца гафленолола $Fe_{73}-Ga_{27}$ имеет особенность в виде двух фазовых переходов. Намагниченность от температуры изменяется линейно при температурах до 300°C. Фазовый переход ферромагнетик-парамагнетик наблюдается при 400°C. Далее следует необратимый структурный фазовый переход, при котором появляется ферромагнитное упорядочение.
4. Температурные зависимости электрического сопротивления галфенола в области низких температур не накладывает никаких ограничений для практического использования сплава, в то время как в области высоких температур существует необратимый фазовый переход, который безвозвратно меняет магнитные характеристики образца.

Глава 1. Литературный обзор.

1.1 Основные отличительные характеристики Галфенолов.

Магнитострикция – самопроизвольная деформация кристалла при изменении магнитного порядка или ориентации вектора намагниченности в нем. Магнитострикцию оценивают значением относительной деформации образца в направлении магнитного поля $\lambda = \frac{\Delta l}{l}$, где Δl – изменение длины образца при намагничивании, l – длина образца в отсутствие магнитного поля. Численное значение коэффициента магнитострикции зависит от типа структуры, кристаллографического направления, напряженности магнитного поля и температуры. При этом линейная магнитострикция может быть как положительной, так и отрицательной, т.е. размеры образца могут как увеличиваться, так и уменьшаться. Относительную магнитострикционную деформацию, возникающую при магнитном насыщении образца, называют константой магнитострикции. Константа магнитострикции уменьшается при нагревании ферромагнетика и обращается в нуль при температуре Кюри ферромагнетика.

Механизм магнитострикции в сплавах железа-галлия обусловлен спин-орбитальным взаимодействием, а её величина зависит от многих параметров. В сплавах железа с галлием атомы галлия замещают атомы железа в кристаллической решетке. Это приводит к изменению размеров кристаллической ячейки и увеличению анизотропии.

В стабильном состоянии галфенол – это поликристалл, состоящий из кристаллических зерен. Среди этих зерен наблюдается преимущественная кристаллографическая ориентация. Чтобы добиться максимального эффекта кристаллографической ориентации среди кристаллических зерен используют методы прокатки и отжига [4]. Зерна растут до тех пор, пока это энергетически выгодно, поэтому невозможно получить монокристалл галфенола методами отжига. Многие из предложенных механизмов, объясняющих, почему рост зерен в итоге прекращается, основываются на

появлении локализованных минимумов энергии на границах зерен, которые могут быть обусловлены: шероховатостью на границах зерен, эффектами толщины образца, потенциальными барьерами (например, дисперсными частицами).

Для получения большего значения магнитострикции при производстве галфенола используются чистые расплавы Fe (>99.99%) и Ga (>99.999%), отжигают при температуре больше 1000К под давлением в аргоновой атмосфере. [5]

1.2 Структура Галфенолов и магнитные свойства.

Максимальные значения константы магнитострикции были получены при 17-19 и 27 атомарных процентов галлия. (Рисунок 1) При этих концентрациях структура вещества приводит к максимальному спин-орбитальному взаимодействию.

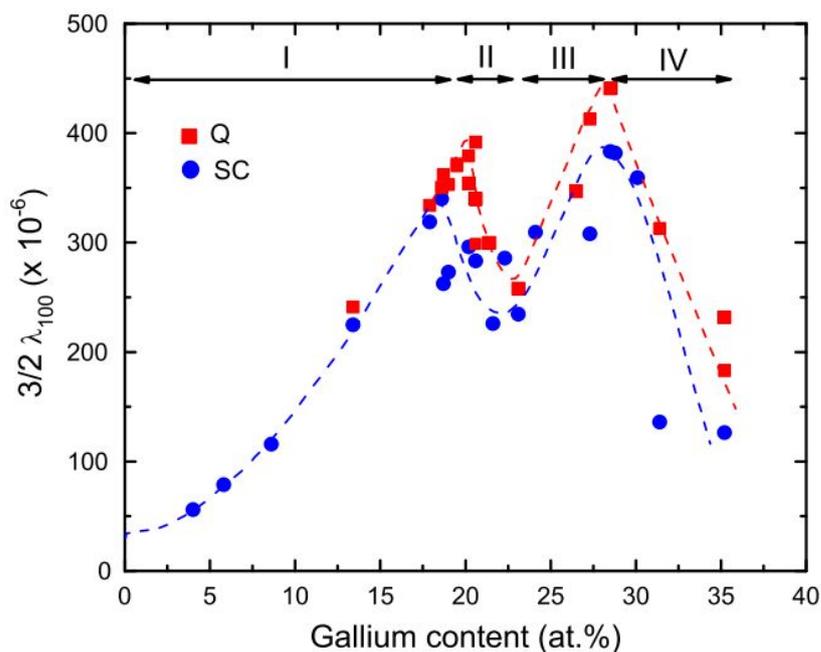


Рисунок 1. График зависимости константы магнитострикции от процентного содержания галлия. Q – быстрое охлаждение сплава после 1200К; SC – медленное охлаждение 10К/мин. [6]

Подобное поведение объясняется наличием в веществе состояний с различной структурой. Фазовые переходы между этими структурами позволяют получить на выходе различные свойства образца.

Пик в 19,5 ат. % Ga был охарактеризован как магнитоотрицательный максимум из-за того, что в материале присутствует только неупорядоченная фаза A2, или, в некоторых случаях, очень небольшое количество фазы D03, что вызывает внутреннюю деформацию и, таким образом, материал сохраняет высокую намагниченность насыщения из-за того, что он богат железом и магнитоотрицательные свойства обусловлены локальными взаимодействиями, поскольку атомы галлия находятся достаточно далеко друг от друга. [7]

Пик в 27 ат. % Ga обусловлен движением и перераспределением атомов галлия в решетке. Структурные переходы в сплаве могут происходить вследствие температурного взаимодействия или приложенного к образцу давления. При нагревании образца Fe₇₃-Ga₂₇ была выявлена следующая последовательность фазовых переходов: D03→L12→D019→A2, где

- A2 структура типа α -Fe со случайно распределенными атомами Fe и Ga, sp. gr. Im3m, $a \approx 2.92 \text{ \AA}$ (при 20 °C);
- D03 структура типа BiF3 с частично упорядоченными атомами Fe и Ga sp. gr. Fm3m, $a \approx 5.83 \text{ \AA}$ (при 20 °C);
- D019 структура типа MgCd3 с частично упорядоченными атомами Fe и Ga, sp. gr. P63/mmc, $a \approx 5.28 \text{ \AA}$, $c \approx 4.28 \text{ \AA}$ (при 20 °C);
- L12 структура типа Cu3Au с частично упорядоченными атомами Fe и Ga, sp. gr. Pm3m, $a \approx 3.72 \text{ \AA}$ (при 20 °C);

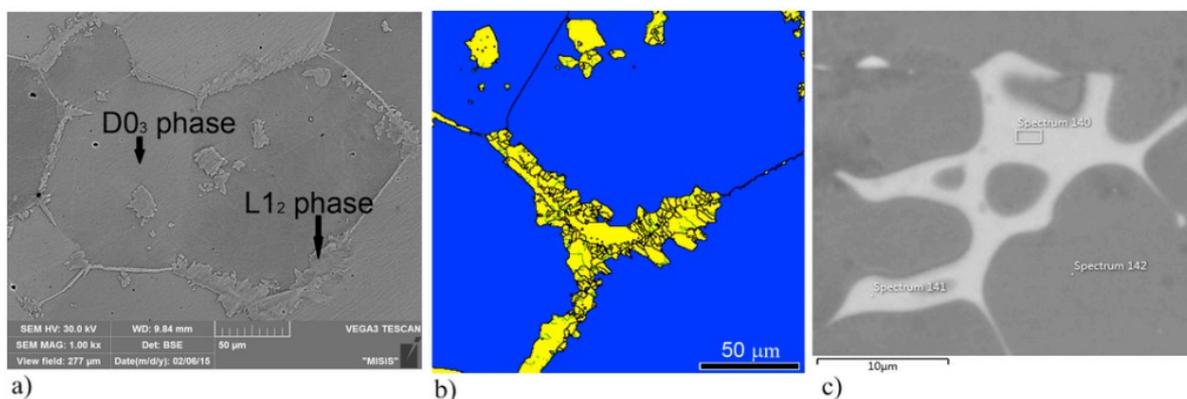
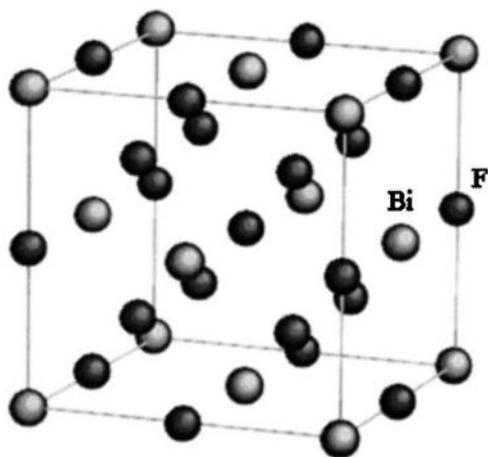


Рисунок 2 Изображения образцов Fe₈₃-Ga₂₇ полученные на сканирующем электронном микроскопе (a), дифракции отраженных электронов (b) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (c). [8]



DO₃ superlattice

Space group: $Fm\bar{3}m$ **Prototype:** BiF₃

Pearson Symbol: cF16

Bi atomic positions:

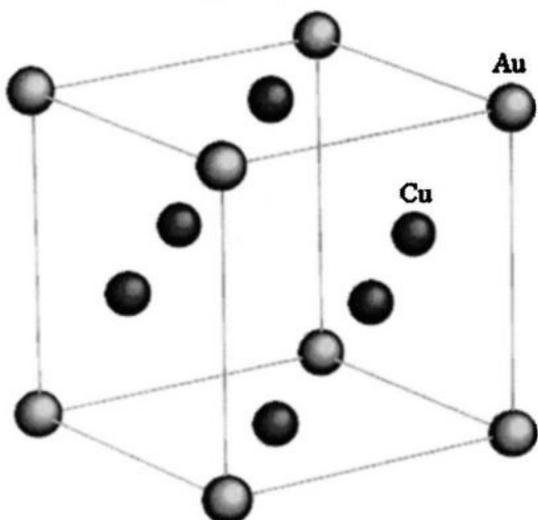
(0, 0, 0) (1/2, 1/2, 0) (1/2, 0, 1/2) (0, 1/2, 1/2)

F atomic positions:

(1/2, 0, 0) (0, 1/2, 0) (0, 0, 1/2) (1/2, 1/2, 1/2)

(1/4, 1/4, 1/4) (1/4, 1/4, 3/4) (1/4, 3/4, 1/4) (3/4, 1/4, 1/4)

(3/4, 3/4, 3/4) (3/4, 3/4, 1/4) (3/4, 1/4, 3/4) (1/4, 3/4, 3/4)



L₁₂ superlattice:

Space group: $Pm\bar{3}m$ **Prototype:** AuCu₃

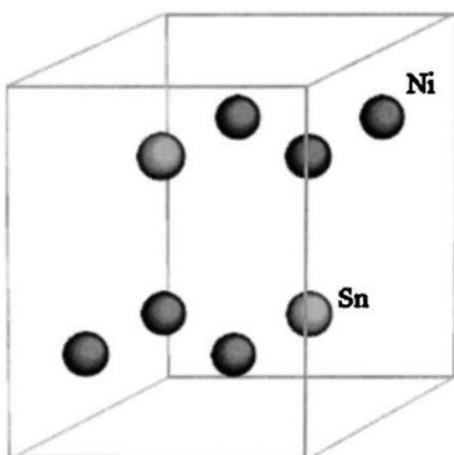
Pearson Symbol: cP4

Au atomic positions:

(0, 0, 0)

Cu atomic positions:

(1/2, 1/2, 0) (1/2, 0, 1/2) (0, 1/2, 1/2)



DO₁₉ superlattice

Space group: $P63/mmc$ **Prototype:** Ni₃Sn

Pearson Symbol: hP8

Ni atomic positions:

(1/6, 1/3, 3/4) (1/3, 1/6, 1/4) (1/6, 5/6, 3/4)

(5/6, 2/3, 1/4) (2/3, 5/6, 3/4) (5/6, 1/6, 1/4)

Sn atomic positions:

(1/3, 2/3, 1/4) (2/3, 1/3, 3/4)

Рисунок 3. Структурные типы галфенола. D03, L12, D019. [9]

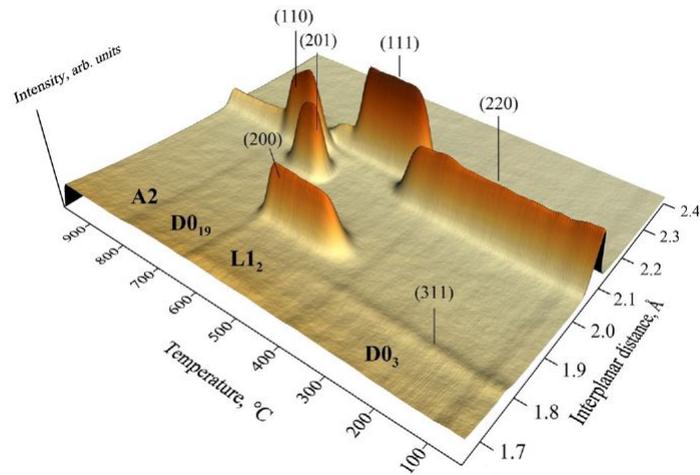


Рисунок 4. Трехмерная визуализация дифракционных пиков на образце Fe73 - Ga27 при равномерном нагревании 2К/мин. [10]

Различные структурные типы будут формироваться при фазовых переходах и, как следствие, магнитные свойства образца будут различаться. На рисунках 3-5 указаны типы кристаллической структуры, полученные экспериментальные последовательности температурных фазовых переходов и построенная на базе множества экспериментов фазовая диаграмма состояний. В том числе будет изменяться по знаку и величине коэффициент магнитострикции.[11] Таким образом значения коэффициента магнитострикции можно варьировать на этапе заготовки.

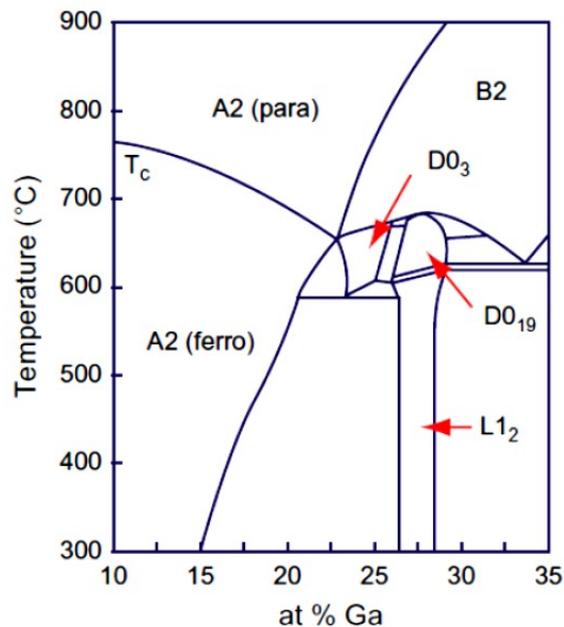


Рисунок 5. Фазовая диаграмма состояний для галфенола. [12]

Образцы с одинаковым составом после изотермического отжига различной продолжительности показывают заметно отличающиеся результаты. (Рис. 6) Это указывает на неоднородность распределения кристаллографических ориентаций в бинарном сплаве.

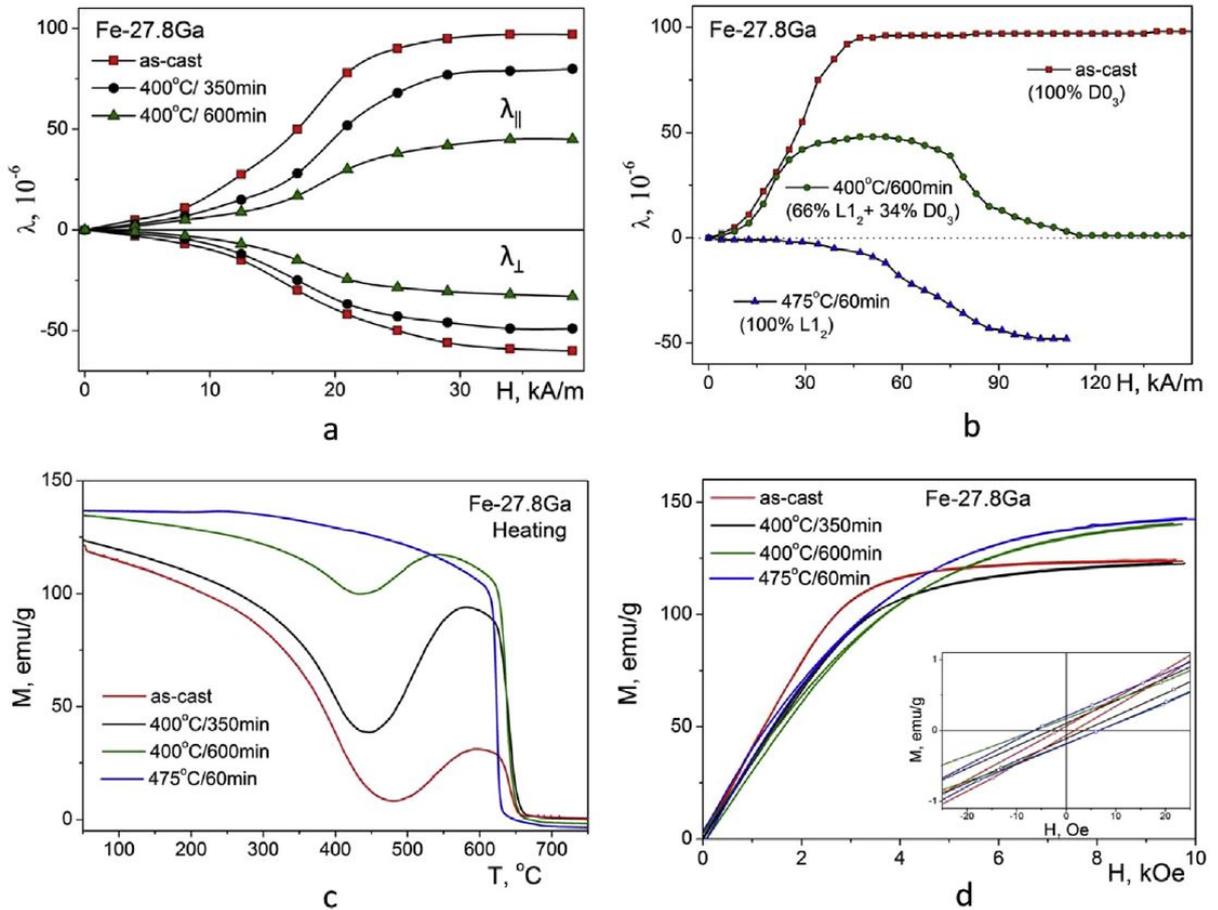


Рисунок 6. а) Перпендикулярная и параллельная магнитострикция
 б) Магнитострикция в более высоких магнитных полях
 в) Зависимость намагниченности от температуры
 д) Кривые намагничивания для образцов Fe73 - Ga27 с разным временем отжига. [11]

Толщина листа прокатки также имеет влияние на преимущественную кристаллографическую ориентацию зерен. Как видно на рисунке ниже, при одинаковом времени и температуре закалки преимущественное направление кристаллографической ориентации заметно отличается так же, как и коэффициент магнитострикции. [13]

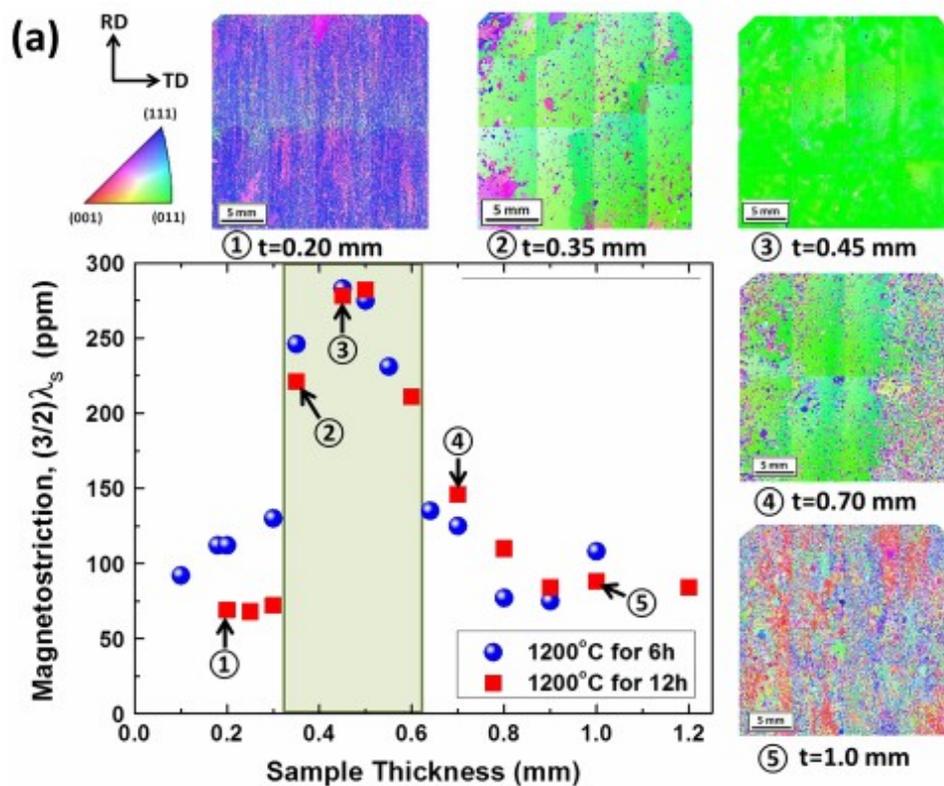


Рисунок 7. Зависимость константы магнитострикции от толщины листа проката.[13]

Наилучшими свойствами с точки зрения коэффициента магнитострикции обладают образцы толщиной от 0.3 до 0.6 миллиметров. Авторы этой работы объясняют различие ростом количества зерен в кристаллографическом направлении [011]. Поверхностная энергия зерен, зависящая от толщины, в сочетании с энергией межзеренного взаимодействия, которая тоже имеет зависимость от толщины образца, являются основными критериями выстраивания кристаллографических ориентаций зерен в галфенолах. Таким образом, преимущество изготовления материала с помощью проката листов не только в возможности уменьшить количество внутренних дефектов, но и в возможности повлиять на распределение ориентаций кристаллографических осей.

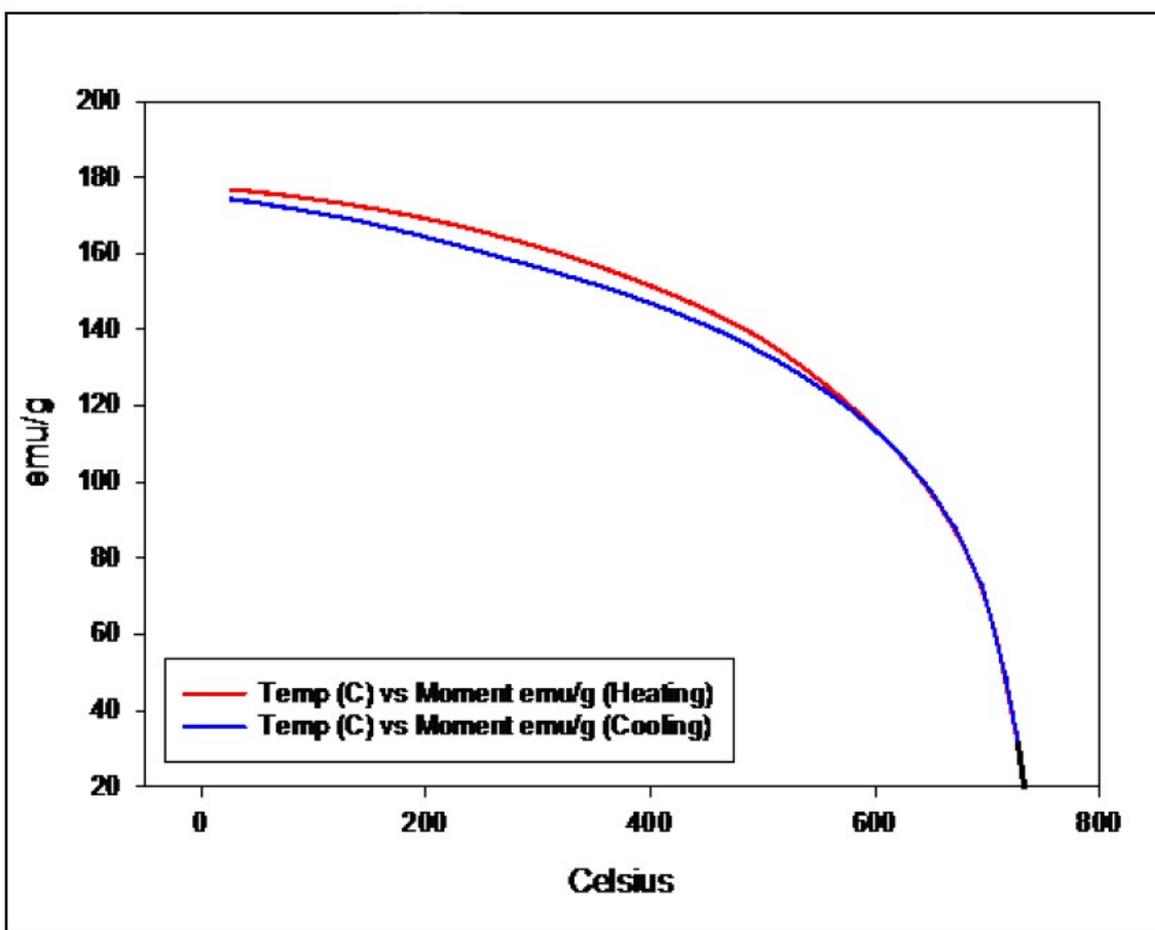


Рисунок 8. График зависимости намагниченности от температуры для образца Fe82.5-Ga17.5.[14]

Результаты исследования магнитных свойств галфенолов указывают, что температура Кюри находится в районе 700 °С и уменьшается с увеличением процентного содержания галлия.[14] Для сравнения у указанного во введении магнестрикционного редкоземельного материала Terfenol-D температура Кюри порядка 400°С [15]

Можно отметить, что магнитные свойства галфенолов на данный момент подробно изучены. Это позволяет в перспективе начать разработку технологий массового производства готовых изделий. Однако, подробно описанные магнитные свойства – это только часть необходимых данных для успешного внедрения материала в промышленность.

1.3 Механические свойства

Зависимости напряжений от деформации для образца галфенола приведены на рисунке 9. На графике показаны сразу две кривые - вдоль направления растяжения и перпендикулярно ему.

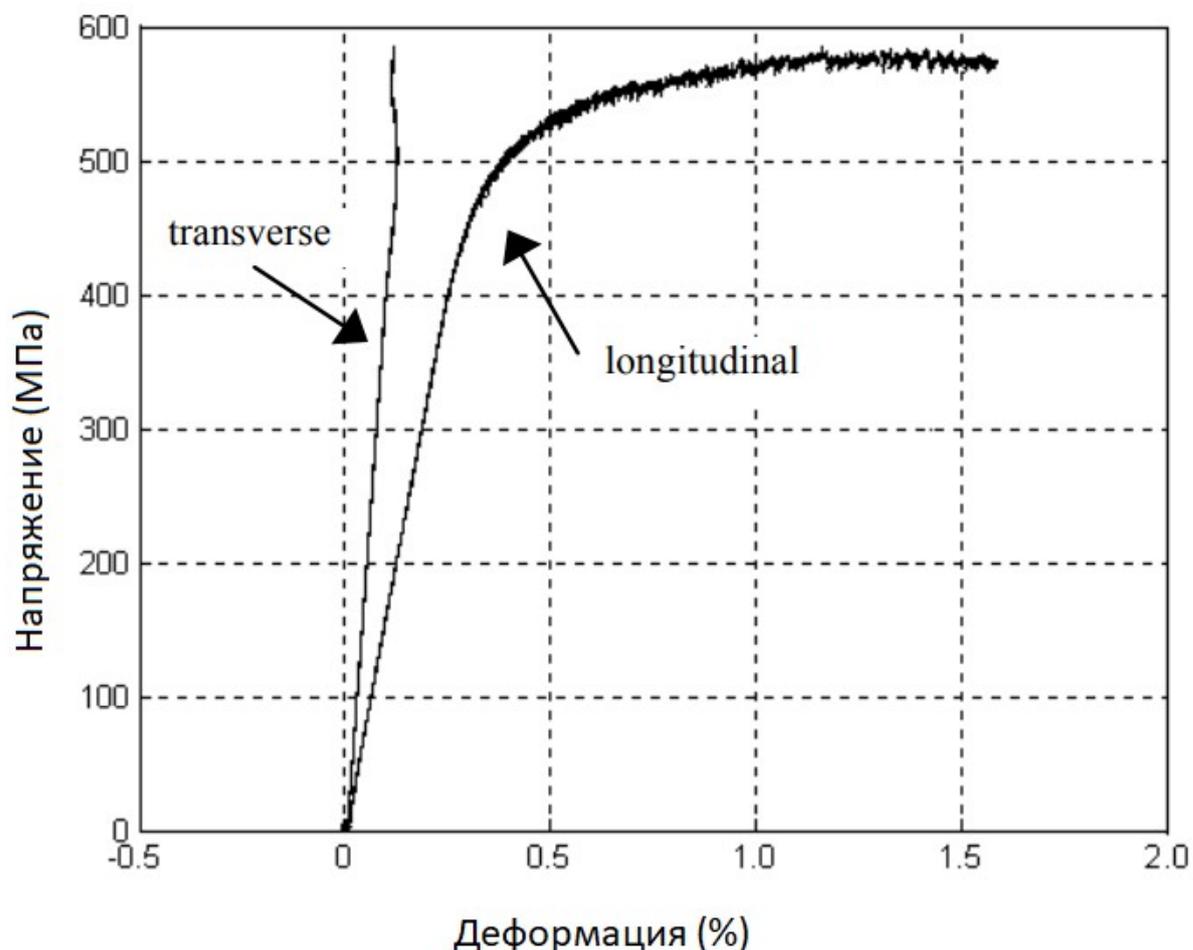


Рисунок 9. Зависимость напряжений от деформаций для монокристаллического образца Fe83-Ga17 при растяжении вдоль кристаллографического направления 110. [16]

Из приведенных зависимостей для материала рассчитаны

- Модуль упругости ~65 ГПа
- Предел прочности ~565 МПа.[16]

Для поликристаллического галфенола диаграмма напряжения-деформации для растяжения будет тем более походить на монокристалл, чем больше кристаллографических зерен будет выстроено в одинаковом направлении. [17]

При этом было показано, что механические константы, отвечающие за характер механического поведения материала, являются зависимыми от температуры. Зависимости модуля упругости и демпфирующей способности (величины потерь) от температуры во внешнем магнитном поле и в его отсутствие для образца Fe₈₁Ga₁₉ показаны на рисунке 11. [18]

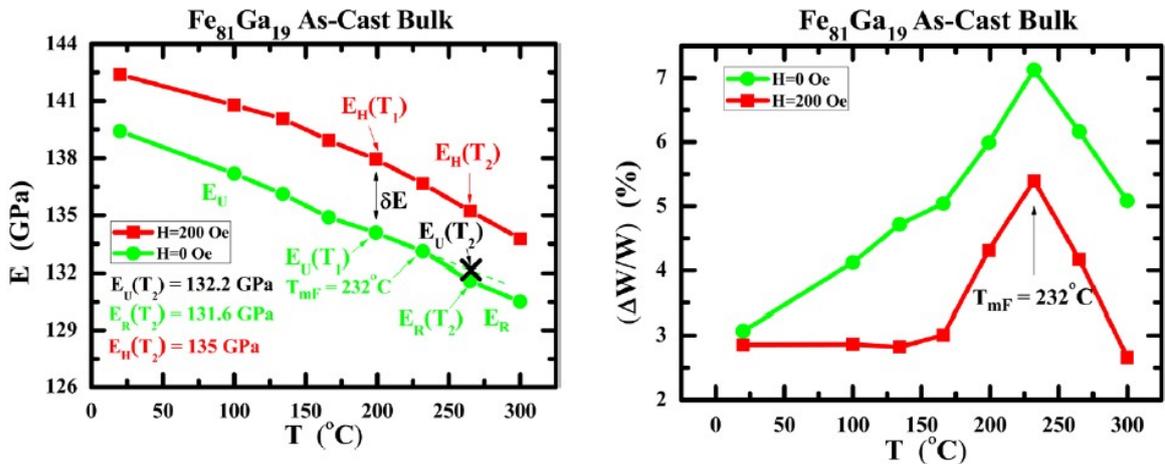


Рисунок 10 а) Зависимость модуля упругости от температуры для образца галфенола б) Демпфирующая способность в зависимости от температуры в двух случаях: в присутствии и отсутствии внешнего магнитного поля.[18]

На рисунке 10 видно, что внешнее магнитное поле увеличивает модуль упругости и при этом уменьшает демпфирующую способность во всем указанном диапазоне температур. Пик поглощения энергии в зависимости от температуры приходится на 232 °С. Интересно, что при этой температуре никаких особенностей для модуля упругости не наблюдается. Не наблюдается также фазовых переходов в этом диапазоне температур.

Сжимающие напряжения в образцах Fe-Ga влияют как на магнитные свойства, так и на значения параметра магнитострикции [16]. Типичные зависимости показаны на рисунке 11. Легко заметить, что при увеличении сжимающих напряжений, большая напряженность магнитного поля требуется как для перемагничивания, так и для наблюдения магнитострикции.

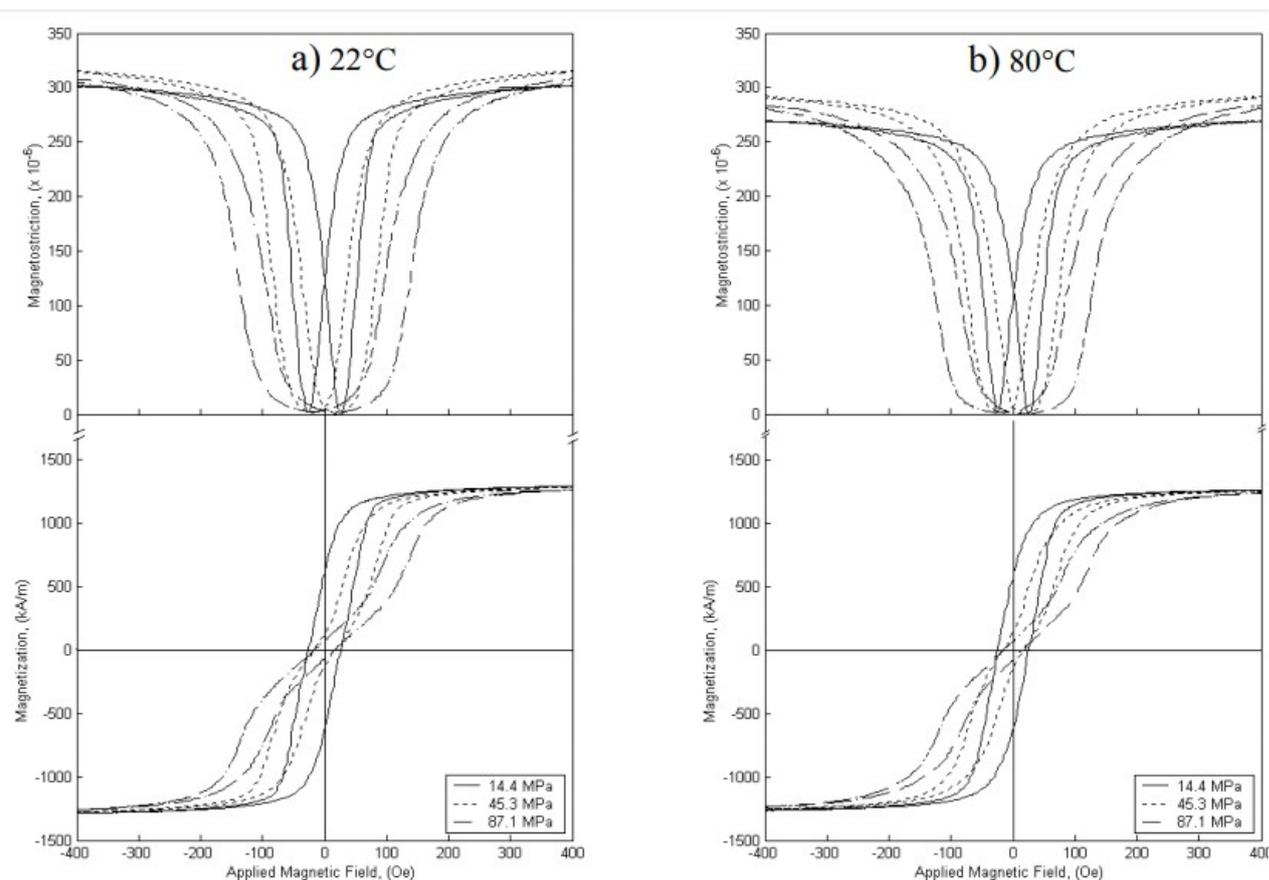


Рисунок 11. Зависимость магнитострикции и намагниченности от напряженности внешнего магнитного поля при различных сжимающих напряжениях. а) при комнатной температуре (22 °С) б) при температуре 80 °С. Все измерения проведены при частоте 0.05 Гц. [16]

С помощью сжимающих напряжений удалось в условиях увеличить константу магнитострикции на 42% по сравнению с ненагруженной конфигурацией [19].

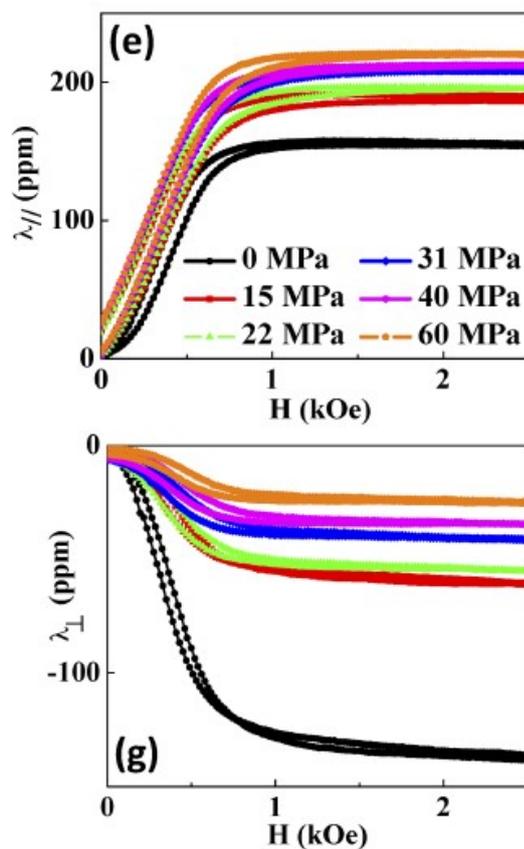


Рисунок 12. Графики зависимости магнитострикции от внешнего магнитного поля, параллельно (e) и перпендикулярно (g) направлению [100] для Fe81_Ga19 при дополнительном сжатии в плоскости (011) в диапазоне сжимающих напряжений 0-60 Мпа [19].

Из рисунков 11 и 12 видно, что значения константы магнитострикции явно зависят от величины сжимающих напряжений, в то время как поле насыщения для кривых с различной сжимающей нагрузкой остается одинаковым. Независимость насыщающего поля подтверждает тот факт, что за эффект магнитострикции в железо-галлиевых сплавах отвечает зернистая структура с выделенным направлением кристаллографической ориентации. Увеличение значения константы магнитострикции – результат двух эффектов. Первый – это преимущественное выстраивание магнитных доменов в отсутствие внешнего магнитного поля вдоль направления, перпендикулярного направлению сжатия. Второй – при приложении внешнего магнитного поля магнитным доменам легче перестраиваться в направлении параллельном направлению напряжения сжатия.

Среди прочих особенностей механических свойств следует отметить, что сплав железо-галлий является ауксетиком. Ауксетики – материалы, имеющие отрицательные значения коэффициента Пуассона. Зависимость коэффициента Пуассона от процентного содержания галлия в сплаве носит характер аналогичный тому, что для константы магнитострикции от процентного содержания галлия.

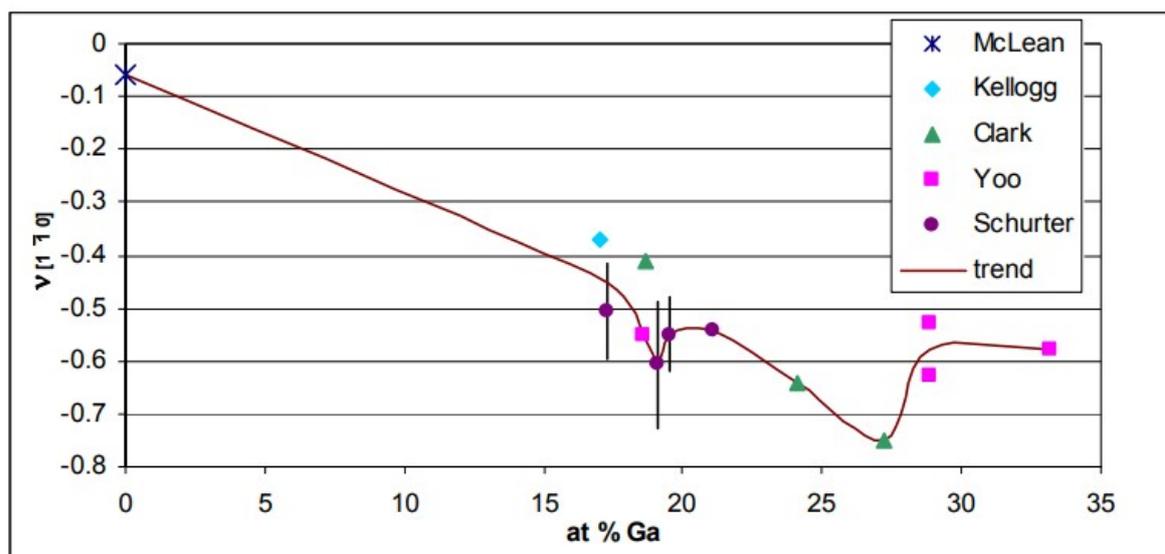


Рисунок 13. График зависимости коэффициента Пуассона от процентного содержания галлия в сплаве.[20]

Локальные минимумы коэффициента Пуассона от процентного содержания галлия соответствуют локальным максимумам магнитострикции.

Кроме того, указанные на диаграмме напряжения-деформации (Рисунок №9) положительные деформации в перпендикулярном направлении также являются следствием отрицательного коэффициента Пуассона.

Магнитострикционный материал с отрицательным коэффициентом Пуассона обладает дополнительной особенностью. При изменении линейных размеров образца, объем образца не сохраняется. При перестроении кристаллических зерен в слабых магнитных полях происходит расширение образца вдоль нескольких кристаллографических направлений. Это приводит к удлинению образца вдоль нескольких направлений и, таким образом, к изменению конечного объема.

1.4 Предсказание поведения материала с помощью математических методов и потенциальные возможности применения сплавов.

Механические и магнитные свойства сплава предсказывают с использованием метода конечных элементов, на основе различных теоретических моделей. Например, пластичная монокристаллическая модель [21] и её модификации [22], трёхмерная гистерезисная и безгистерезисные модели [7]. Результаты теоретических исследований используются для решения оптимизационных задач, таких, как вычисление оптимальных распределений ориентации кристаллов, которые приводят к желаемым упругопластическим свойствам. [23]

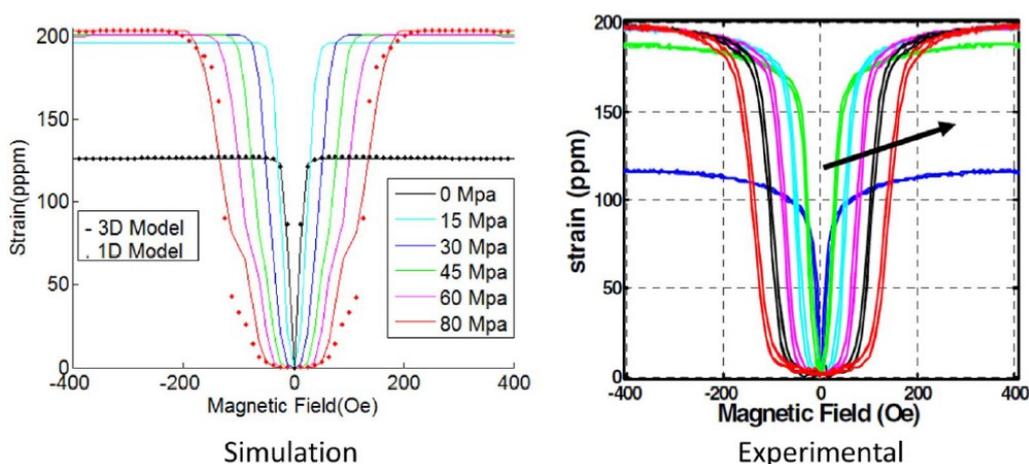


Рисунок 14 Зависимость магнитострикционной деформации от внешнего магнитного поля при напряжениях сжатия в диапазоне 0-80 МПа. Слева – результаты математического моделирования.[24] Справа – результаты эксперимента.[25]

Галфенол успешно показал себя в качестве ферромагнитного материала в многослойных структурах с туннельным магнетосопротивлением. [26] Магниторезистивные характеристики показали изменение сопротивления устройства на 11,5%. Это значение, которое намного ниже 200% в структурах Fe/MgO/Fe, однако достаточно велико, чтобы его можно было использовать в гибридных устройствах, в которых механическое напряжение будет использоваться для воздействия на намагниченность магнитострикционного слоя.

Галфенол используется в качестве магнитострикционного материала в магнитоэлектрических композитах. (Рисунок 15) За счет лучших механических свойств это позволило получить более высокий магнитоэлектрический коэффициент связи.[27] Прямой магнитоэлектрический эффект состоит в генерации электрического поля в образце во внешнем магнитном поле. Магнитное поле вызывает магнитострикционную деформацию ферромагнитных слоев, которая передается ферроэлектрическим слоям и приводит к генерации связанных зарядов и, соответственно, напряжения на поверхностях структуры вследствие пьезоэффекта. Изменение намагниченности структуры при создании в ней электрического поля называется обратным магнитоэлектрическим эффектом. Приложенное к электродам структуры напряжение вызывает электрострикционную деформацию ферроэлектрического слоя, которая передается ферромагнитному слою и приводит к изменению намагниченности структуры вследствие обратной магнитострикции. [28]

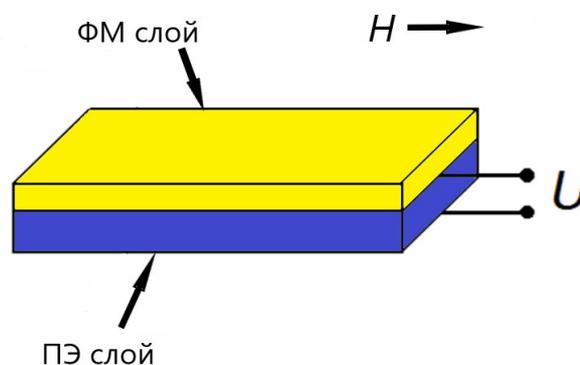


Рисунок 15 Схематичное изображение магнитоэлектрического композитного материала.

Также, была показана возможность использования галфенола в качестве самостоятельного датчика крутящего момента. [29] Датчик также основан на эффекте обратной магнитострикции – возникновении намагниченности при упругой деформации. Преимущество такого датчика в бесконтактном методе детектирования крутящего момента. Это позволяет использовать его там, где классические тензометрические датчики неприменимы.

1.5 Динамические свойства Галфенолов.

Авторами статьи [30] были получены зависимости индукции магнитного поля от напряженности внешнего магнитного поля различной частоты для образца галфенола. (Рис. 16)

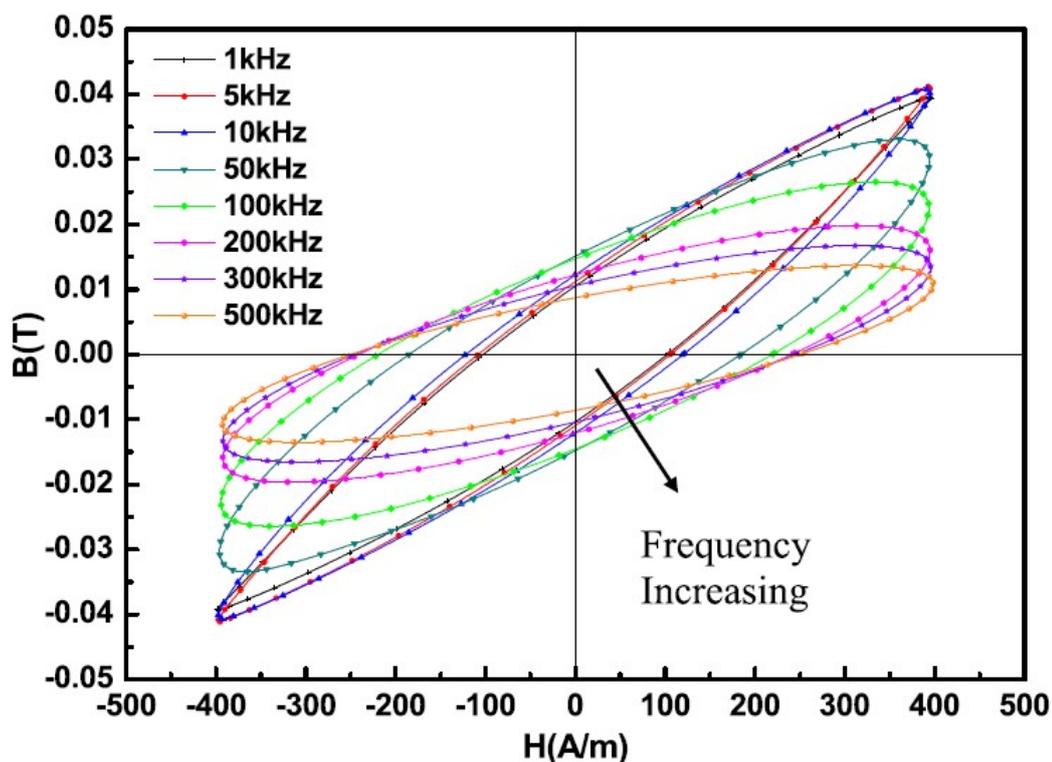


Рисунок 16 График зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля при изменении частоты внешнего магнитного поля от 1 до 500 кГц.[30]

Измерения показывают, что чем выше частота, тем меньше соответствующая максимальная намагниченность. Авторы статьи утверждают, что площадь цикла между кривыми намагниченности и магнитного поля увеличивается с увеличением частоты. На рисунке 16 показано, что с увеличением частот соответствующая максимальная намагниченность уменьшается, величина гистерезиса увеличивается, и максимальная намагниченность достигается быстрее. При малых частотах перемагничивание с помощью смещения доменных границ более энергетически выгодно. При частоте более 200кГц достигается состояние насыщения.

1.6 Транспортные свойства Галфенолов.

Транспортные свойства материала – это способность материала к распространению того или иного физического параметра, например, электропроводность и теплопроводность. В данной работе изучается электропроводность галфенола. Физической основой явления электрического сопротивления является рассеяние электронов проводимости. Отличительной особенностью ферромагнитного материала является наличие спонтанной намагниченности, в результате чего внутри каждого домена существует магнитная индукция, которая влияет на прохождение через него электрического тока. Удельное сопротивление такого материала зависит от магнитной индукции и для его определения необходимо учитывать распределение намагниченности в среде. Важно учитывать также вклады в сопротивление от рассеяния электронов на доменных границах и магнитных структурах внутри них (вихревые структуры, спиновые волны на поверхностях границ). Известно, что при увеличении температуры под воздействием температурных колебаний электрическое сопротивление линейно увеличивается. Температурные фазовые переходы будут влиять на эту зависимость, изменяя её характер.

Количественное описание транспортных свойств необходимо для использования материала в качестве датчика, поглотителя энергии. На данный момент опубликованных статей, описывающих транспортные свойства галфенола в широком диапазоне температур, обнаружено не было, поэтому данная работа посвящена исследованию этих свойств.

Глава 2. Методика измерений и описание образцов.

2.1 Получение экспериментальных образцов Fe-Ga.

Серия образцов с различным процентным содержанием галлия была получена в Московском Институте Стали и Сплавов методом Бриджмена-Стокбаргера с использованием чистого железа и галлия в среде заполненной чистым аргоном в мини-печи Indutherm MC–20V. Химические составы были определены с помощью метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Образцы имеют форму прямоугольного параллелепипеда и их размеры приведены в (Табл. 1)

№ образца	Химический состав	Размер образца
1	Fe ₇₃ -Ga ₂₇	2x2x4 мм
2	Fe _{75.2} -Ga _{24.8}	1x1x1 мм
3	Fe _{72.7} -Ga ₂₇ -Tb _{0.3}	2x2x4 мм
4	Fe _{80.1} -Ga _{19.8} -Tb _{0.1}	2x2x2 мм

Образцы для исследований предоставлены профессором МИСиС Головиным Игорем Станиславовичем.

Для всей серии образцов получены полевые зависимости намагниченности. Для измерения температурных характеристик намагниченности и электрического сопротивления из образцов №1 и №2 были вырезаны с торца прямоугольные параллелепипеды размером 3x2x0.3 мм. К образцам приваривались медные электроды методом искровой точечной сварки. Метод основан на возникновении искры при быстротечной разрядке конденсатора в момент замыкания электрической цепи. В нашем случае замыкание цепи проходит через медный электрод и образец.

2.2 Методика измерений магнитных свойств.

Вибрационный магнитометр VSM Lake Shore 7407 использовался для измерений магнитных свойств образцов. Общий вид установки показан на рисунке 17. Образец закрепляется на кварцевом держателе при помощи фумленты. Держатель с образцом приводится в движение с частотой 82 Гц генератором механических колебаний. Образец, совершая колебания, изменяет магнитный поток, пронизывающий измерительные катушки. Изменение потока внутри катушек приводит к возникновению ЭДС индукции в катушках вследствие закона электромагнитной индукции Фарадея. Величина ЭДС прямо пропорциональна магнитному моменту образца. Четыре катушки соединены попарно-последовательно и расположены навстречу друг к другу. После усиления сигнала ЭДС он преобразуется в цифровой формат и, далее, передается на рабочий компьютер. Этот сигнал пропорционален магнитному моменту образца. Магнитное поле создается электромагнитом и измеряется с помощью датчика Холла, помещенного в непосредственной близости от образца. Установка имеет специальную низкотемпературную вставку для проведения низкотемпературных измерений (продувной криостат). Вставка помещается в объем между измерительными катушками. Принцип действия вставки основан на продуве хладагента (азота) через объем, в котором находится образец. Шахта, в которой расположен образец, изолирована от окружающей среды вакуумной рубашкой, откачиваемой до высокого вакуума с целью максимального пресечения теплообмена с окружающей средой. Для регулировки температуры в шахте предусмотрен нагревательный элемент, через который протекает ток, величина которого регулируется для стабилизации необходимой температуры, что позволяет изменять температуру измерений от температуры жидкого азота до 400 К. Поиск необходимой величины тока, пропускаемого через нагревательный элемент, осуществляется при помощи алгоритма стабилизации температуры. Алгоритм основан на вычислении и сравнении трех слагаемых,

обуславливающих искомую величину тока. Все три слагаемых выводятся из функции ошибки (разницы между заданной температурой и её текущим значением), зависящей от времени. Первое слагаемое прямо пропорционально разнице температур и является коэффициентом пропорциональности P (proportional), второе слагаемое равняется интегралу функции ошибки по времени, умноженному на коэффициент I (integral), а третье является производной функции ошибки по времени, умноженной на коэффициент D (derivative). PID алгоритм позволяет более точно стабилизировать температуру в отличие от алгоритмов, учитывающих только пропорциональный ошибке вклад в значение задаваемого тока на нагревательном элементе. Значения констант P , I и D определяются в процессе калибровки. Также эти константы, вместе с такими параметрами, как скорость повышения температуры и время стабилизации, различны в пределах 9-го (при работе на жидком гелии) или 6-го (при работе на жидком азоте) так называемых «температурных доменов» - условных диапазонов температур, различающихся условиями их стабилизации [31, 32].

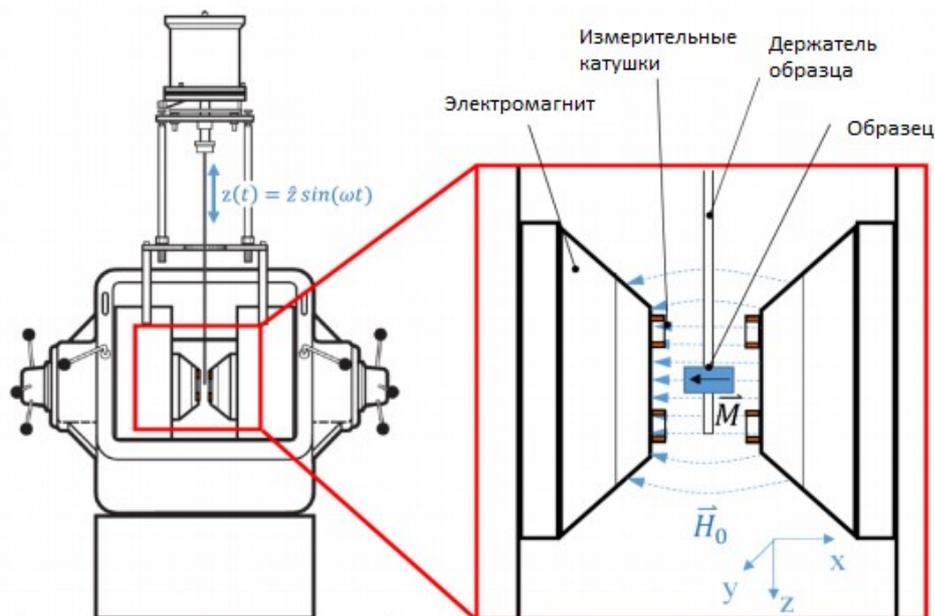


Рисунок 17. Схема установки VSM LakeShore. [31]

Вибрационный магнетометр также приспособлен для проведения высокотемпературных измерений. Принцип работы аналогичен с описанным выше с той разницей, что вместо хладагента при продуве используется инертный газ аргон, который нагревается по принципу PID в зависимости от необходимой температуры. В процессе выполнения работы измерения проводились при комнатной температуре в диапазоне полей от +16кЭ до -16кЭ с направлением поля вдоль трёх взаимно перпендикулярных осей образцов. Также, были проведены измерения зависимости намагниченности от температуры с использованием температурной вставки при постоянном магнитном поле 10кЭ для температурного диапазона от 77.4К до 400К, и при постоянном магнитном поле 4кЭ для температурного диапазона от 300К до 1000К. При проведении высокотемпературных измерений образец закреплялся помещался в контейнер специального высокотемпературного держателя. Погрешность от магнитного вклада держателя измерялись отдельно. Итоговый вклад не превышает 0,001% от сигнала образца.

2.3 Методика измерений полевых зависимостей магнитосопротивления.

Исследовалась зависимость сопротивления от внешнего магнитного поля. Электрическое сопротивление измерялось с помощью четырехточечного метода. Четырехточечный метод подразумевает параллельное подключение токовых и потенциальных электродов к образцу. (Рис. 18) Это позволяет избавиться от нежелательных вкладов в сопротивление со стороны проводников и тем самым улучшить точность измерений.

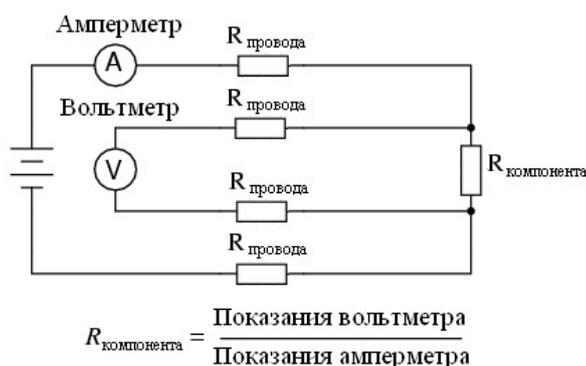


Рисунок 18. Схематичное изображение подключения измерительных приборов к образцу.

Образец закреплялся на текстолитовой подложке. К образцу методом ультразвуковой сварки приваривались тонкие алюминиевые контакты, которые соединялись с медной частью текстолитовой подложки. Подложка подсоединялась к измерительной вставке. Вставка опускалась в сверхпроводящий соленоид так, чтобы направление поля было перпендикулярно продольной стороне образца, вдоль которой пропускался электрический ток. В соленоид подавался ток, по величине которого вычислялась величина магнитного поля, в котором находился образец. Через токовые контакты сквозь образец пропускался ток, создаваемый источником питания Актаком АТН-1237 и стабилизируемый на схеме выравнивания тока. Электрический ток через образец при каждом измерении дважды меняет свое направление, чтобы при дальнейшем усреднении избавиться от дающих вклад в сопротивление паразитных эффектов, зависящих от направления протекания тока, например, возникновения термоЭДС. В схему пропускания тока также подключался мультиметр Актаком АВМ-4561 для измерения текущих значений тока через образец для повышения точности получаемых значений сопротивления. Напряжение на образце измерялось микровольтметром Keithley 2000. При каждом измерении набиралась статистика экспериментальных данных с мультиметра и микровольтметра, после чего производилось их усреднение. Усредненное значение передавались на рабочий компьютер, где обрабатывалось и сохранялось для дальнейшей работы с результатами. Измерения проводились при температуре жидкого азота 77.4К в диапазоне магнитных полей от +8кЭ до -8кЭ.

2.4 Методика измерений температурных зависимостей магнитосопротивления.

Исследовалась зависимость сопротивления от температуры. Сопротивления измерялось с помощью четырехточечного метода. Использовался аналогичный блок питания АКТАКОМ с аналогичным значением постоянного тока пропускаемого через образец 10мА. Напряжение

аналогичным образом измерялось микровольтметром Keithley 2000. Для проведения температурных измерений была сконструирована электрическая печь, позволяющая проводить измерения в диапазоне до 700 °С с скоростью нагрева 3К в минуту. Схема установки показана на рисунке 20. В качестве нагревательного элемента использовалась намотка из нихромовой проволоки. Напряжение на нагревательный элемент подавалось с помощью двух параллельно подключенных источников тока (максимальные значения постоянного тока и напряжения у одного источника тока 10 Ампер и 30 Вольт). Температура измерялась с помощью промышленной термопары UT-41700105 подключенной через АЦП ARDUINO к рабочему компьютеру. Образец помещался внутрь электрической печи в непосредственной близости к термопаре, токовые и потенциальные электроды выводились через специальное отверстие и подключались к измерительному оборудованию.

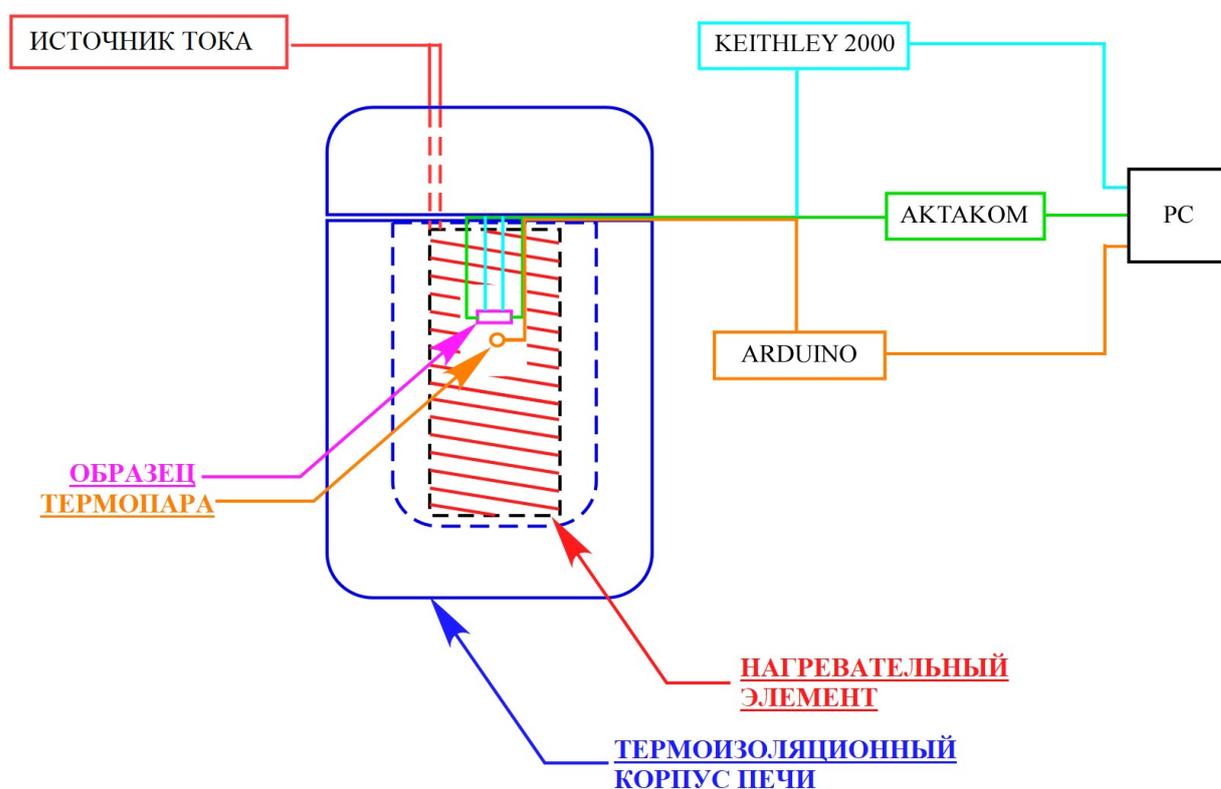


Рисунок 19. Схематическое изображение измерительной установки для проведения высокотемпературных измерений магнитосопротивления.

2.5 Методика измерений магнитострикции.

Измерения магнитострикции в образцах галфенола проводились тензометрическим методом на базе установки в МГТУ МИРЭА. Для измерений выбирались объемные продольные образцы галфенола. Размеры образцов 20x4x2 мм. К продольной стороне образца приклеивался тензодатчик с помощью клея БФ-6. Образец помещался во внешнее магнитное поле, направленное вдоль длины образца, и фиксировался в поперечном направлении механически. Магнитное поле напряженностью до 2кЭ создавалось электромагнитом. Магнитное поле измерялось датчиком Холла, находящимся в непосредственной близости к образцу. С изменением линейных размеров образца (при изменении намагниченности) изменялось сопротивление тензодатчика. Изменение сопротивления измерялось по мостовой схеме. (Рис. 20) По изменению сопротивления определялась деформация образца согласно паспорту тензодатчика.

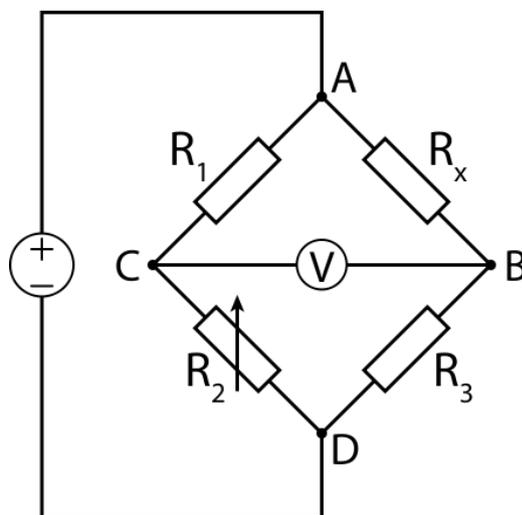


Рисунок 20. Измерительный мост с вольтметром в диагонали. Тензорезистор обозначен R_x .

Глава 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение.

3.1 Результаты измерений зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля.

Результаты измерений зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля были получены автором при подготовке бакалаврской выпускной квалификационной работы. [33] Для всех образцов были выполнены измерения полевых зависимостей магнитного момента при комнатной температуре, из которых были вычислены зависимости удельной намагниченности (магнитный момент на единицу массы).

На графике (Рис. 21 а, б) представлены зависимости намагниченности от магнитного поля для двух составов галфенола.

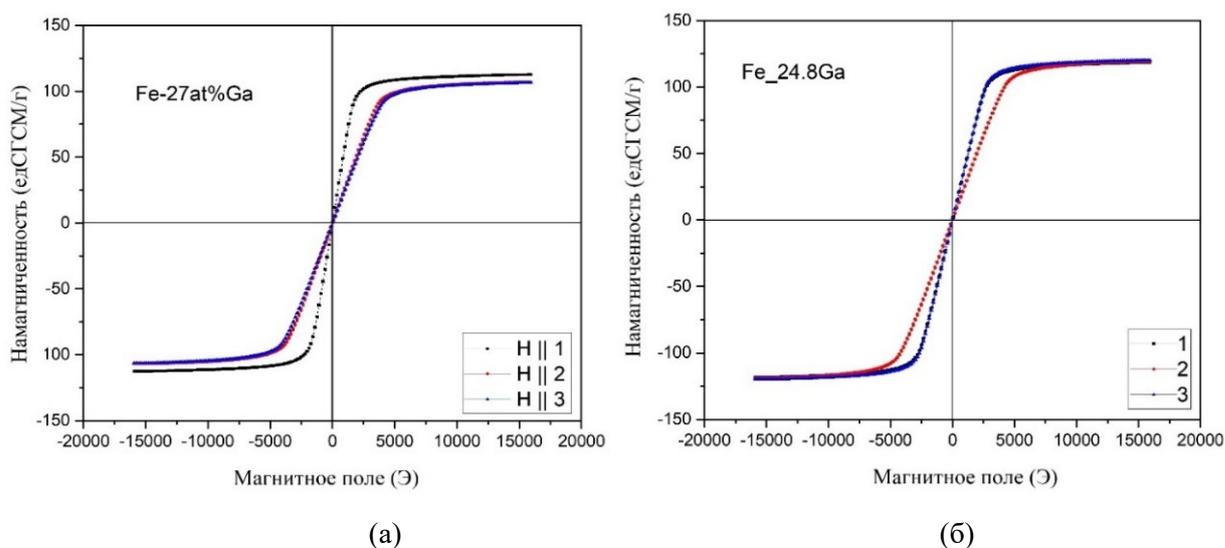


Рисунок 21. Графики зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля полученные на VSM для двух образцов галфенола (а)Fe73-Ga27 и (б)Fe75.2-Ga24.8 для трех направлений магнитного поля вдоль осей образца.

Как видно из графиков, кривые намагничивания для этих образцов показали схожий магнитномягкий характер. Анизотропия отдельно взятого образца в данном случае вызвана анизотропией формы. При добавлении небольшого количества тербия в сплав Fe-Ga анизотропия оказывается более выраженной. (Рис. 22 а, б) Это связано с тем, что атомы тербия замещают

железо в кристаллической решетке, и вызывают изменение магнитной структуры и магнитной анизотропии.

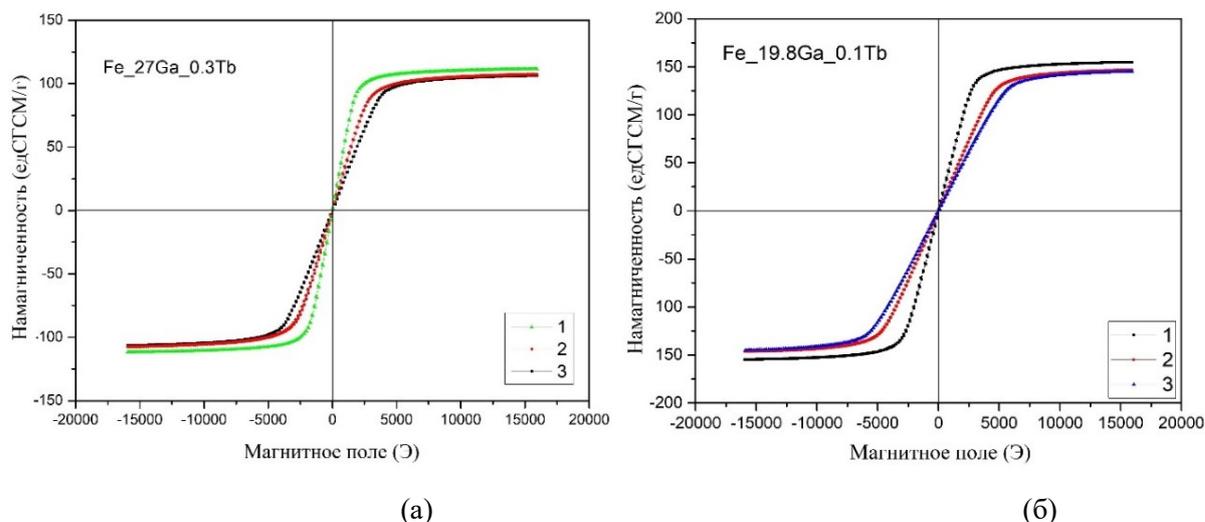


Рисунок 22. Графики зависимости намагниченности от внешнего магнитного поля, полученные на VSM для двух образцов галфенола (а)Fe72.7-Ga27-Tb0.3 и (б)Fe80.1-Ga19.8 –Tb0.1, для трех направлений магнитного поля вдоль осей образца.

Для сравнения в таблице 2 приведены основные результаты измерений магнитных свойств серии образцов сплавов галфенола. Легко заметить, что полученные результаты свидетельствуют о том, что при небольшом изменении состава магнитные свойства могут значительно измениться. Полученные значения намагниченности насыщения и коэрцитивной силы соотносятся с результатами исследований других авторов [9] – [12].

	I_s (едСГСЭ/Г)	H_c (Э)	H_s (Э)
Fe ₈₃ -Ga ₂₇	107.7	33.5	3333
Fe _{75.2} -Ga _{24.8}	113	33.5	4031
Fe _{72.7} -Ga ₂₇ -Tb _{0.3}	104	33	4085
Fe _{80.1} -Ga _{19.8} –Tb _{0.1}	147.5	35	5645

Таблица 2. Основные результаты полевых зависимостей.

3.2 Результаты измерений зависимости намагниченности образца от температуры.

Были проведены измерения в двух температурных диапазонах: от температуры жидкого азота до 400К и от комнатной температуры до 1000К. Измерения зависимости намагниченности от температуры в первом температурном диапазоне были получены автором при подготовке бакалаврской выпускной работы.[33] Измерения проводились при постоянном магнитном поле 10кЭ для образца Fe₇₃-Ga₂₇. Полученная зависимость показывает монотонное убывание намагниченности при увеличении температуры. (Рис. 23) Это свидетельствует о том, что в данном температурном интервале не происходит изменений магнитной структуры.

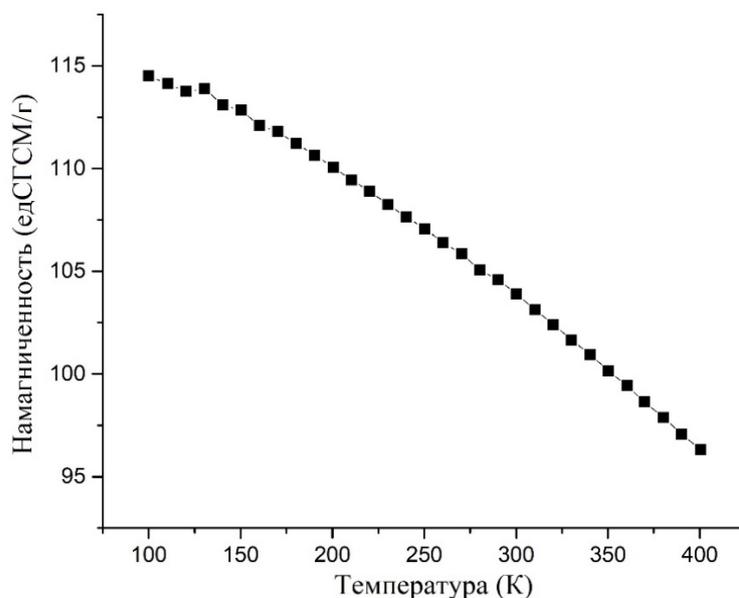


Рисунок 23. График зависимости намагниченности от температуры для образца Fe₇₃-Ga₂₇ в диапазоне температур от 77.4К до 400К. Напряженность магнитного поля направлена вдоль длины образца.

Для остальных образцов исследованной серии образцов зависимость намагниченности от температуры в данном температурном диапазоне будет иметь схожий характер, так как все образцы имеют одинаковый структурный тип.

Результаты для температурного диапазона от 300К до 1000К были получены для образца Fe₇₃-Ga₂₇ при постоянном магнитном поле 4кЭ. Полученная зависимость представлена на рисунке 24.

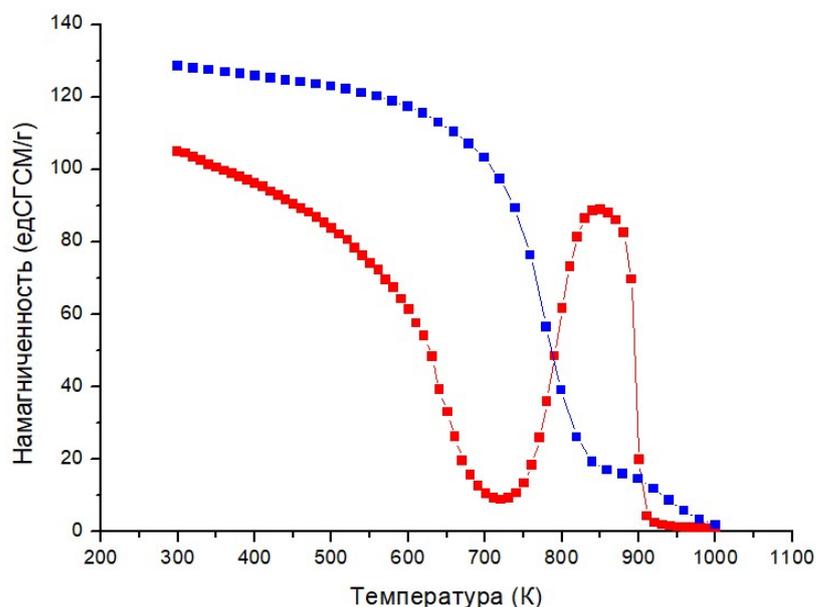


Рисунок 24. График зависимости намагниченности от температуры для образца Fe₇₃-Ga₂₇ в диапазоне температур от 300К до 1000К при напряженности внешнего магнитного поля 4кЭ. Первый температурный проход.

Как видно на рисунке 24 кривая зависимости намагниченности от температуры имеет несколько значений температуры Кюри. Это связано с тем, что в данной области температур происходит поочередно сразу несколько фазовых переходов. Первый – изменение магнитного упорядочения ферромагнетик-парамагнетик. Второй – изменение кристаллической структуры, появление новой фазы и, в дальнейшем, изменение магнитной структуры, которое приводит к парамагнитному состоянию. После проведения эксперимента значение намагниченности при комнатной температуре изменилось на 23%.

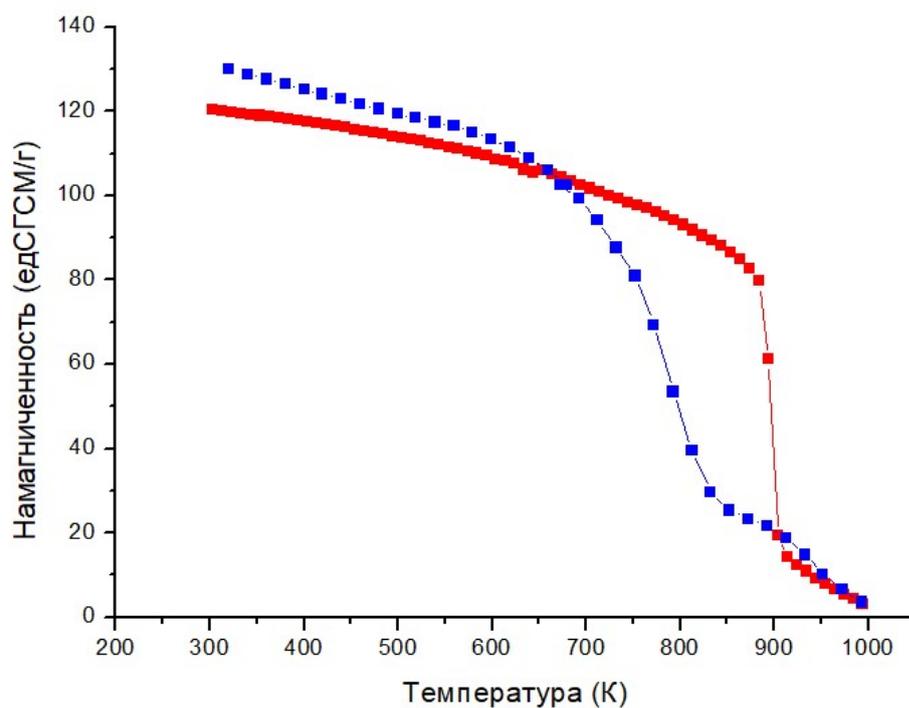


Рисунок 25. График зависимости намагниченности от температуры для образца Fe73-Ga27 в диапазоне температур от 300К до 1000К при напряженности внешнего магнитного поля 4кЭ. Второй температурный проход.

На рисунке 25 показан температурных ход намагниченности уже при повторном нагреве. При сравнении графиков видно, что фазовые переходы связанные с перестроением кристаллической структуры [10] являются необратимыми. При нагреве образца зависимость намагниченности от температуры значительно отличается, в то время как при охлаждении зависимость ведет себя схожим образом. Похожие температурные кривые наблюдались в литературе.[14]

3.3 Результаты измерений магнитострикции.

Исследования магнитострикции для образцов $Fe_{73}-Ga_{27}$ и $Fe_{75.2}-Ga_{24.8}$ были проведены ранее автором при подготовке бакалаврской работы.[33] Магнитострикция измерялась в направлении вдоль длины образца. Из графиков (Рис. 26) видно, что для состава с процентным содержанием галлия 24.8% наблюдается большее значение магнитострикции насыщения, чем для состава с 27% содержанием. В то же время, согласно исследованиям [7], большим значением магнитострикции должен обладать образец с 27% содержанием галлия. Несоответствие результатов, вероятно, связано с тем, что в исследуемых образцах галфенола направления кристаллических зерен не совпадают с направлением длины образца. Таким образом, при получении галфенола в качестве магнитострикционного материала направление кристаллизации зерен играет ключевую роль.

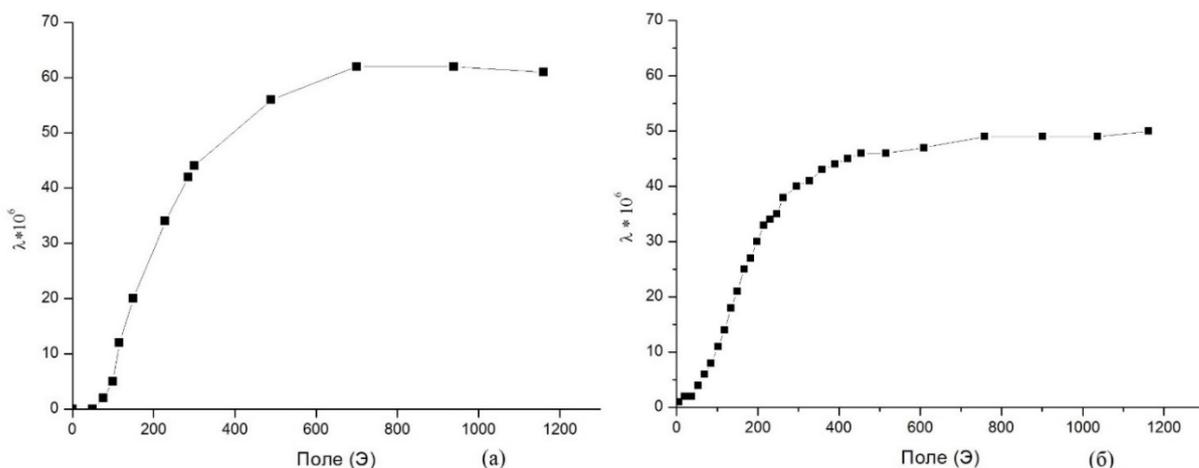


Рисунок 26. Графики зависимости магнитострикции от внешнего магнитного поля а) $Fe_{75.2}-Ga_{24.8}$; б) $Fe_{73}-Ga_{27}$.

Сравнивая графики зависимости магнитострикции и намагниченности от внешнего магнитного поля можно заметить, что магнитострикция достигает насыщения раньше (500 Э), чем намагниченность (3500 Э). (Рис. 21, 26) Насыщение магнитострикции при малой напряженности внешнего магнитного поля является важной особенностью галфенола, которую

необходимо учитывать при использовании материала в многослойных структурах в качестве магнитоотрицательного материала.

3.4 Результаты измерений полевых транспортных свойств.

Исследовалась зависимость электрического сопротивления образцов галфенола $Fe_{73}Ga_{27}$ и $Fe_{75.2}Ga_{24.8}$ при температуре жидкого азота от внешнего магнитного поля. Для каждого значения магнитного поля было проведено 100 измерений значения электрического сопротивления. Итоговое значение получалось путем усреднения проведенных измерений. Результаты данных экспериментов представлены на графиках ниже.

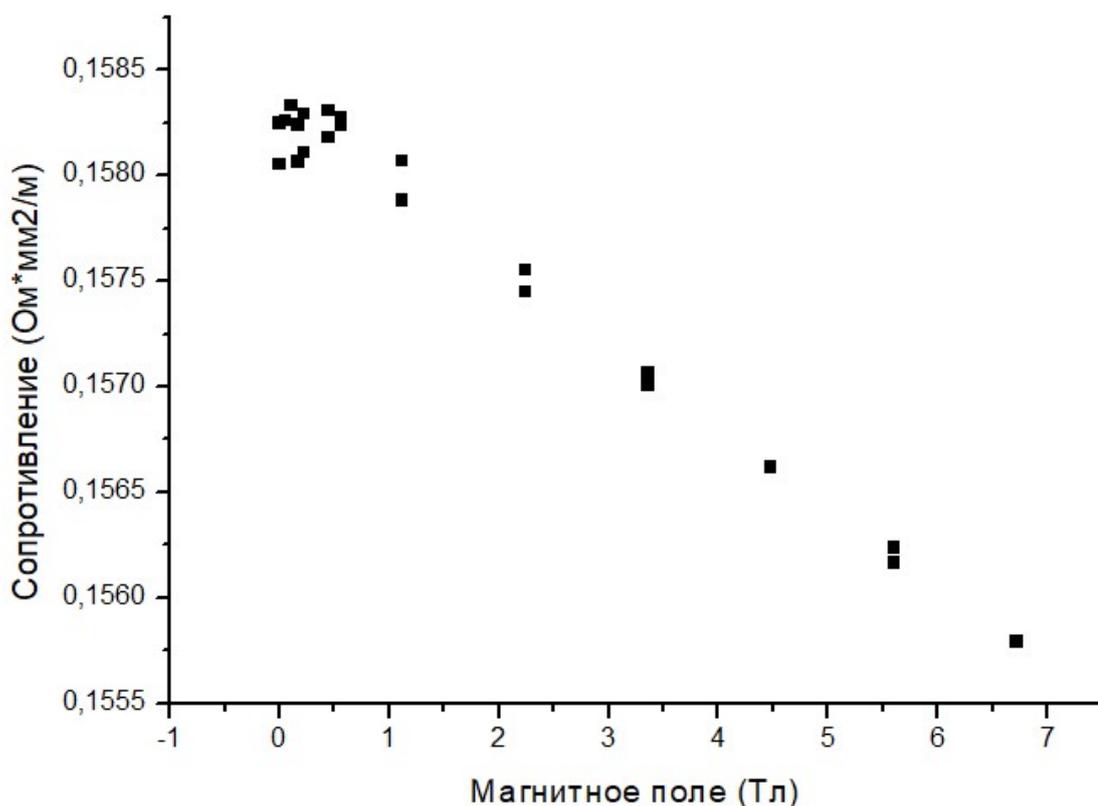


Рисунок 27. График зависимости удельного электрического сопротивления образца галфенола $Fe_{73}Ga_{27}$ от величины напряженности магнитного поля. Температура образца 77.4К. Магнитное поле перпендикулярно направлению протекания электрического тока в образце.

Из графика видно, что зависимость электрического сопротивления от внешнего магнитного поля носит линейный характер. Максимальное

относительное изменение сопротивления при внешнем перпендикулярном магнитном поле 6.7 Тл составляет 1.55%.

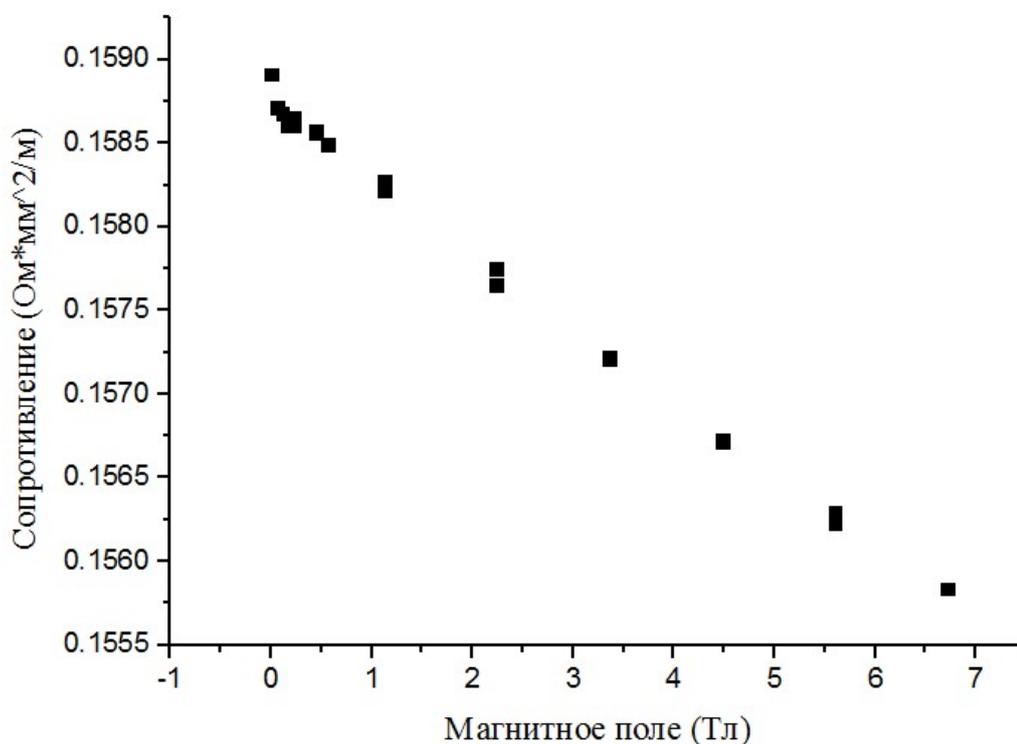


Рисунок 28. График зависимости удельного электрического сопротивления образца галфенола Fe₇₃-Ga₂₇ от величины напряженности магнитного поля. Температура образца 77.4К. Магнитное поле параллельно направлению протекания электрического тока в образце.

Из графика выше видно, что зависимость электрического сопротивления от внешнего магнитного поля при параллельной конфигурации магнитного поля относительно направления пропускания тока через образец носит также линейный характер. Максимальное относительное изменение сопротивления при внешнем параллельном магнитном поле 6.7 Тл составляет 1.93%.

Таким образом, можно посчитать численное значение анизотропного магнитного сопротивления для образца Fe₇₃-Ga₂₇.

$$\Delta R = |R_{\perp} - R_{\parallel}| = |1.55\% - 1.93\%| = 0.38\%$$

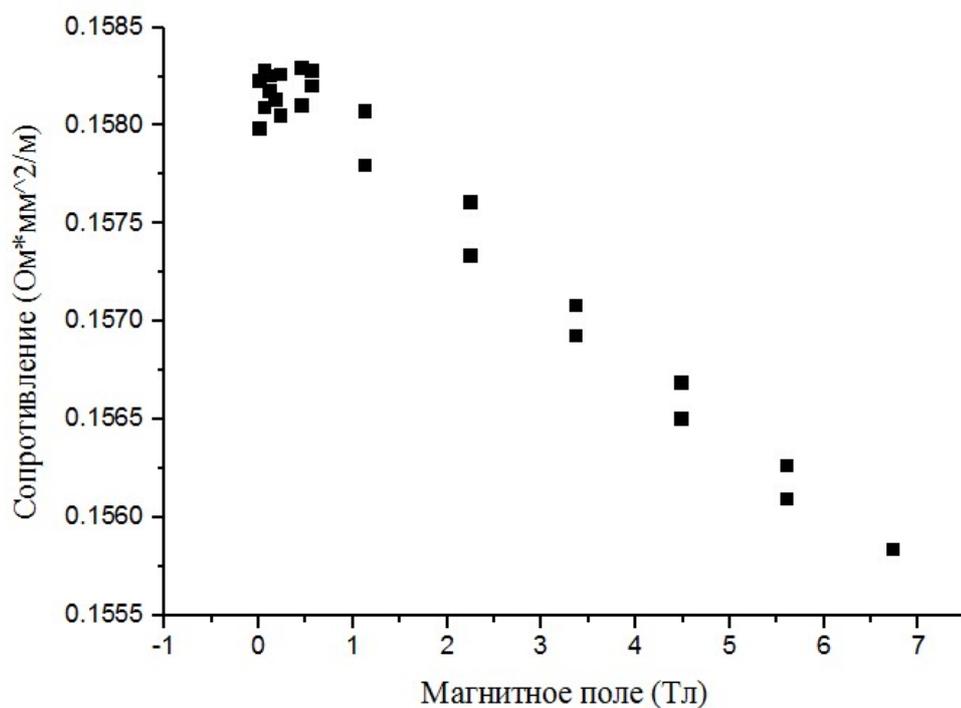


Рисунок 29. График зависимости удельного электрического сопротивления образца галфенола Fe_{75.2}-Ga_{24.8} от величины напряженности магнитного поля. Температура образца 77.4К. Магнитное поле перпендикулярно направлению протекания электрического тока в образце.

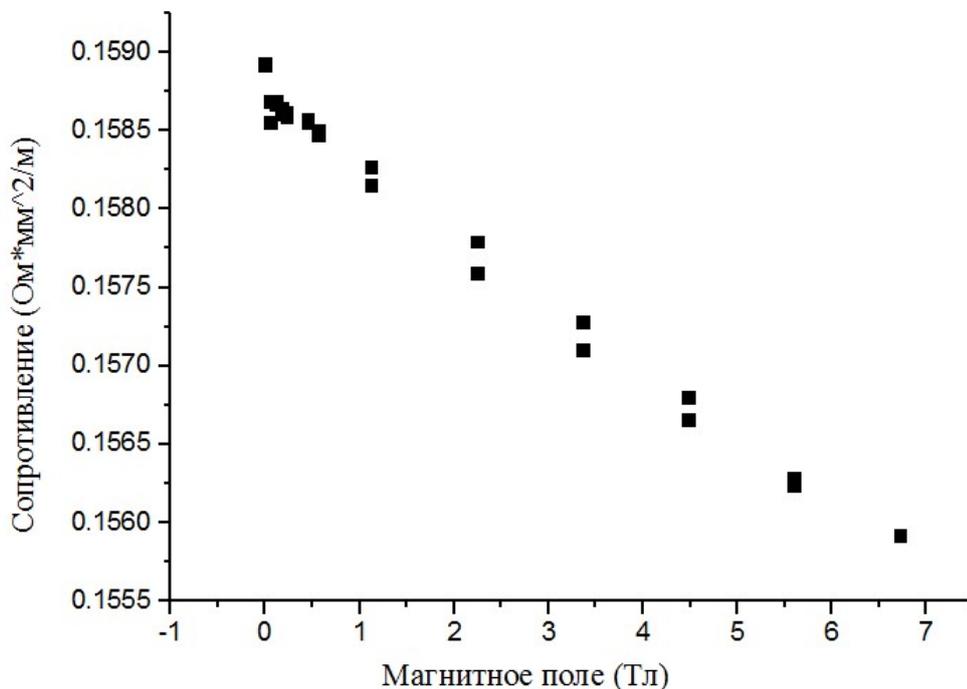


Рисунок 30. График зависимости удельного электрического сопротивления образца галфенола Fe_{75.2}-Ga_{24.8} от величины напряженности магнитного поля. Температура образца 77.4К. Магнитное поле параллельно направлению протекания электрического тока в образце.

Характер зависимости удельного электрического сопротивления от напряженности внешнего магнитного поля для образца Fe_{75.2}-Ga_{24.8} совпадает с аналогичной зависимостью для образца Fe₇₃-Ga₂₇. Схожий диапазон значений и линейная зависимость указывают на аналогичную кристаллографическую структуру образца. Значения магнитосопротивления при максимальном внешнем магнитном поле 6.7 Тл для перпендикулярной конфигурации 1.56%, для параллельной 1.89%. Тогда анизотропное магнитосопротивление образца Fe_{75.2}-Ga_{24.8}

$$\text{AMP} = |R_{\perp} - R_{\parallel}| = |1.56\% - 1.89\%| = 0.33\%$$

Полевые зависимости показаны для образцов галфенолов с различным процентным содержанием галлия. Зависимость сопротивления от поля оказалась линейной функцией в широком диапазоне магнитных полей. Отклонение от линейного поведения происходит в малых полях, в области, где намагниченность не достигла своего насыщения. Однако, этот вклад пренебрежимо мал по сравнению с общим значением сопротивления. Таким образом, использование галфенолов в качестве проводника электрического тока для различных применений возможно без дополнительных поправок на внешнее магнитное поле.

3.5 Результаты измерений температурных транспортных свойств.

Исследовалась зависимость электрического сопротивления образцов галфенола Fe₇₃-Ga₂₇ и Fe_{75.2}-Ga_{24.8} от температуры без внешнего магнитного поля и в присутствии внешнего магнитного поля напряженностью 200 эрстед. Для каждого значения температуры было проведено 10 измерений значения электрического сопротивления. Итоговое значение сопротивления в точке получалось путем усреднения проведенных измерений. Результаты данных экспериментов представлены на графиках ниже.

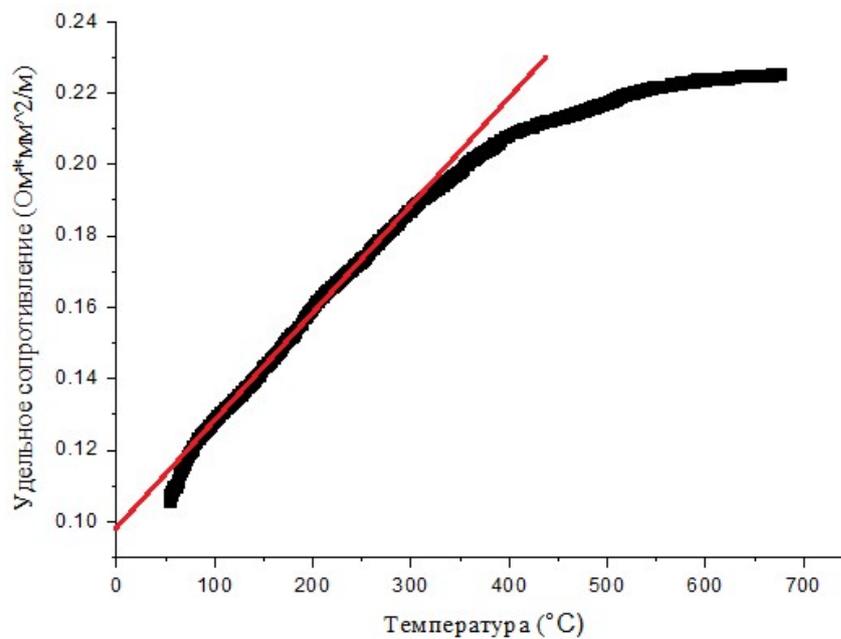


Рисунок 31. График зависимости удельного электрического сопротивления образца галфенола Fe75.2-Ga24.8 от температуры. Внешнее магнитное поле не прикладывалось. Красная линия – аппроксимация линейной области. Значение производной в линейной области 3.22×10^{-4}

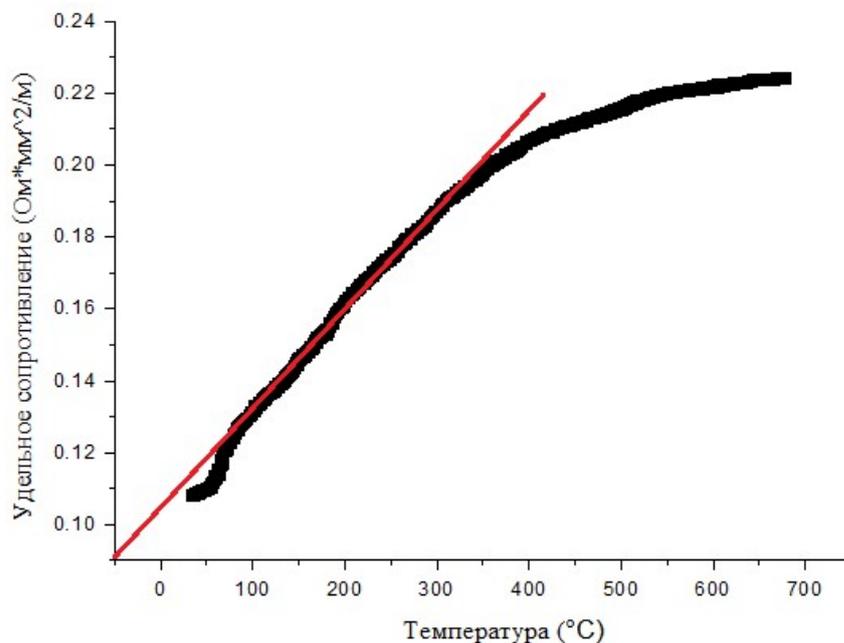


Рисунок 32. График зависимости удельного электрического сопротивления образца галфенола Fe75.2-Ga24.8 от температуры. Приложено внешнее магнитное поле напряженностью 200 Э. Красная линия – аппроксимация линейной области. Значение производной в линейной области 3.1×10^{-4}

Как видно из графиков, значение удельного сопротивления от температуры не является прямой пропорциональной зависимостью. Линейным участок является до температуры приблизительно 400 °С. На представленных графиках показано значение для производной на линейном участке зависимости. Далее, при температурах выше 400 °С начинается область нелинейного изменения электрического сопротивления. Согласно анализу дифракционной нейтрографии (Глава 2, рисунок 4) и фазовой диаграммы (Глава 2, рисунок 5) в области выше 400 °С у галфенола начинаются фазовые переходы. Принимая во внимание тот факт, что фазовый переход сопровождается изменением физических параметров в том числе проводимости, можно сделать вывод, что на представленных графиках изменение поведения зависимости электрического сопротивления от температуры вызвано именно перестроением кристаллической структуры внутри образца.

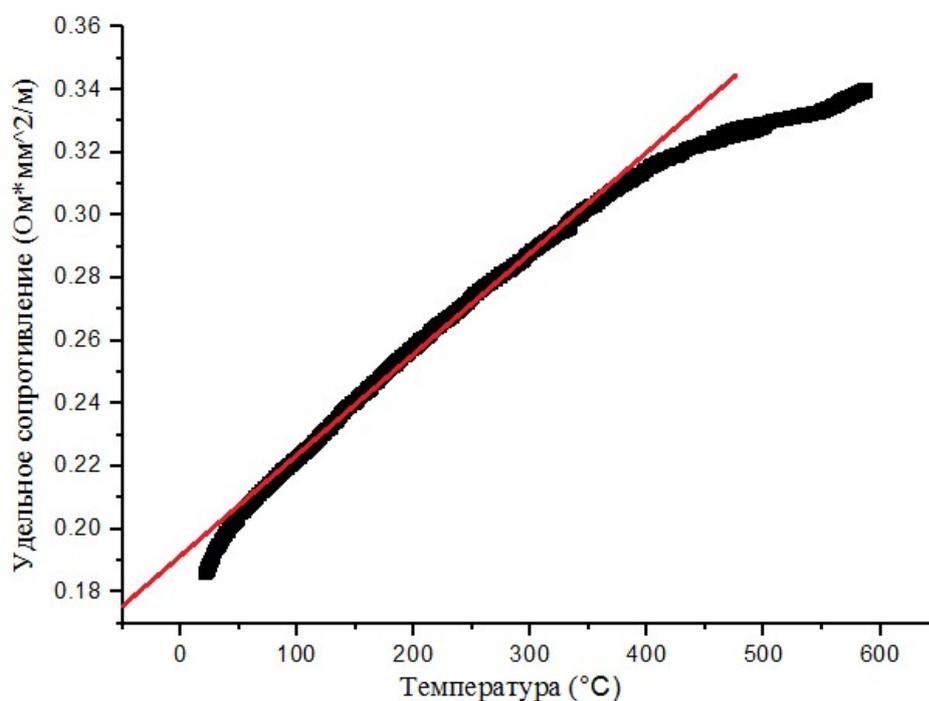


Рисунок 33. График зависимости удельного электрического сопротивления образца галфенола Fe₇₃-Ga₂₇ от температуры. Внешнее магнитное поле не прикладывалось. Красная линия – аппроксимация линейной области. Значение производной в линейной области 4.41×10^{-4}

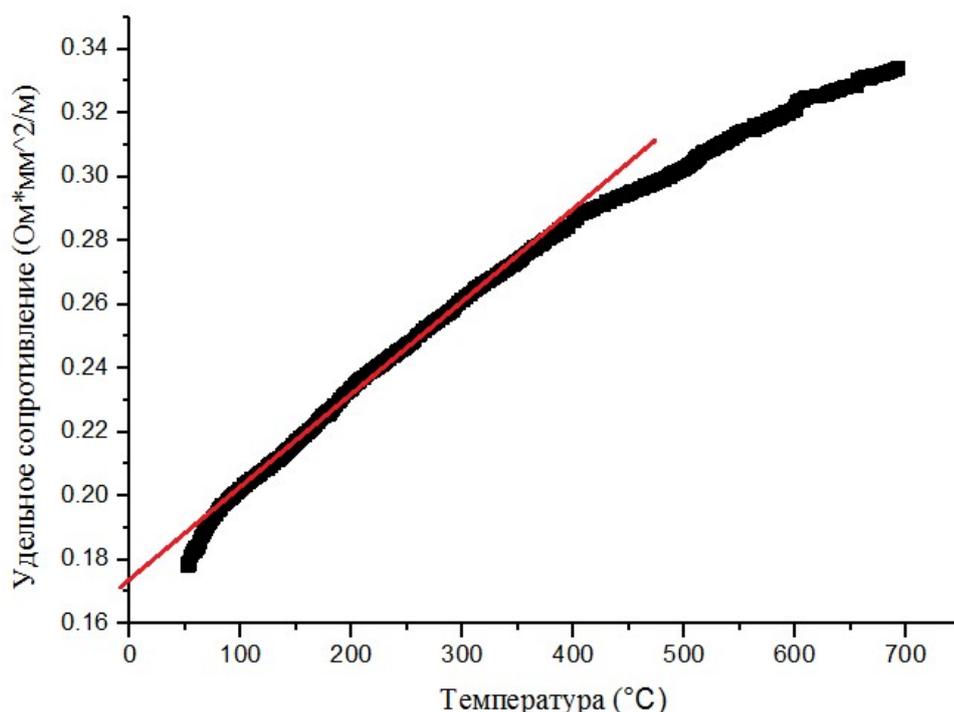


Рисунок 34. График зависимости удельного электрического сопротивления образца галфенола Fe₇₃-Ga₂₇ от температуры. Приложено внешнее магнитное поле напряженностью 200 Э. Красная линия – аппроксимация линейной области. Значение производной в линейной области 3.93×10^{-4}

Для образца Fe₇₃-Ga₂₇ характер кривых существенно не поменялся. Линейный участок зависимости удельного электрического сопротивления от температуры сохраняется до ~450 °C. Далее следует нелинейная область, также вызванная перестроением внутренней кристаллической структуры.

Наличие внешнего магнитного поля при проведении эксперимента не внесло существенных изменений в характер поведения температурных зависимостей. В самом деле, само по себе магнитосопротивление в галфеноле, как было показано в результатах измерений полевых зависимостей сопротивления, не вносит существенный вклад в электрическое сопротивление. ($dR/R \sim 0.23\% / 1 \text{ Тл}$). Предполагалось, что внешнее магнитное поле может повлиять на перестроение кристаллической структуры в образце при его нагревании. Однако, при сравнении графиков зависимости удельного электрического сопротивления от температуры видно, что

магнитное поле не повлияло на характер кривой. Для образца Fe_{75.2}-Ga_{24.8} разница между кривыми пренебрежимо мала. Для образца Fe₇₃-Ga₂₇ разница между кривыми незначительная, но всё же заметная. Во-первых, производная на линейном участке отличается. Во-вторых, характер кривой в нелинейной области также не совпадает при приложении внешнего магнитного поля. Однако, эта разница незначительна и связана с особенностью проведения эксперимента. Образец после первого температурного эксперимента уже изменил свою внутреннюю конфигурацию. Изменения при этом оказываются необратимыми. Характер кривой в нелинейной области зависит от температурного градиента при проведении эксперимента. В двух представленных экспериментах градиент мог не совпадать. Это, вместе с необратимыми фазовыми переходами, внесло изменение в характер нелинейного поведения образца.

Основные результаты работы и выводы:

1. Установлено, что зависимость электрического сопротивления от внешнего магнитного поля образцов галфенола Fe₇₃-Ga₂₇ и Fe_{75.2}-Ga_{24.8} имеет линейный характер. Значения анизотропного магнитосопротивления 0.38% и 0.33%, соответственно.
2. Получены экспериментальные результаты зависимости удельного электрического сопротивления от температуры при напряженности внешнего магнитного поля 200 Э и при нулевой напряженности магнитного поля для образцов галфенола Fe₇₃-Ga₂₇ и Fe_{75.2}-Ga_{24.8}. Установлено, что зависимость имеет нелинейный характер в области температур выше 450°C. Наличие внешнего магнитного поля 200Э не влияет на ход кривой.
3. Зависимость намагниченности от температуры в диапазоне температур от -195,75 °C до 720°C для образца гафленола Fe₇₃-Ga₂₇ имеет особенность, связанную с необратимым фазовым переходом, в области температур ~500°C.

4. Отклонение электрического сопротивления от линейной зависимости при изменении температуры связано со структурным фазовым переходом и не связано с изменением магнитного упорядочения. При этом необратимый температурный фазовый переход меняет магнитные характеристики образца.
5. Температурные изменения электрического сопротивления галфенола в области низких температур не накладывает никаких ограничений для практического использования, в то время как в области высоких температур существует необратимый кристаллический фазовый переход, который безвозвратно меняет магнитные характеристики образца.

Список Литературы.

1. A.E. Clark, K.B. Hathaway, M.Wun-Fogle, J.B. Restorff, T.A. Lograsso, V.M. Keppens, G. Petculescu, R.A. Taylor, J. Appl. Phys. 2003, V.93. P.8621-8623.
2. Summers, Eric & A. Lograsso, Thomas & D. Snodgrass, Jonathan & C. Slaughter, Julie. Proc SPIE. 2004. 5387.
3. T. Ueno, E. Summers, M. Wun-Fogle, T. Higuchi, Sensors Actuators. 2008. A148. P.280-284
4. A. E. Clark, J. B. Restorff, M. Wun-Fogle, T. A. Lograsso, and D. L.Schlagel, IEEE Trans. Magn. 2000. V.36. P.3238–3240.
5. I.S. Golovin, V.V. Palacheva, A.I. Bazlov, J. Cifre, N. Nollmann, S.V. Divinski, G. Wilde, JALCOM. –2016. V.656 P.897-902.
6. Q. Xing, Y. Du, R.J. McQueeney, T.A. Lograsso, Acta Mater. –2008. –V.56. –P.4536–4546.
- 7 - Hui Wang, Scientific Reports –2013. –V.3, –A:3521.
8. A.M. Balagurov, I.A. Bobrikov, I.S. Golovin, V.V. Cheverikin, S.A. Golovin Materials Letters. –2016. –V.181. –P.67–70.
9. N. Srisukhumbowornchai and S. Guruswamy Journal of Applied Physics. – 2002. –V.92, –P.5371-5379.
10. I.S. Golovin, A.M. Balagurov, V.V. Palacheva, I.A. Bobrikov, V.B. Zlokazov, Materials and Design. –2016. –V.98. –P.113–119.
11. V.V. Palacheva, A. Emdadi, F. Emeis, I.A. Bobrikov, A.M. Balagurov, S.V. Divinski, G. Wilde, I.S. Golovin, Acta Materialia. –2017. –V.130. – P.229-239.
12. O. Ikeda, R. Kainuma, I. Ohnuma, K. Fukamichi, K. Ishida, J. Alloys Comp. –2002. –V.347, –P.198.
13. Suok-Min Na, Alison Flatau, AIP ADVANCES. –2017. –V.7, –N.5. – A:056406.

14. C. J. Quinn // The Fabrication and Analysis of the Magnetic and Crystallographic Properties of Fe-rich ($\text{Fe}_x\text{Ga}_{1-x}$) Gallenol Alloys. // Greater Manchester. –2012. –260 pages.
15. Marcelo J. Dapino , Frederick T. Calkins, Alison B. Flatau Smart Structures and Materials: Smart Structures and Integrated Systems. –1998. –V3329.
16. R. A. Kellogg, //Development and modeling of iron-gallium alloys.// Retrospective Theses and Dissertations.–2003. –158 pages.
17. Suok-Min Na, Alison Flatau, AIP Advances. –2017. –V.7, –A:056406.
- 18 - S U Jen, Y Y Lo and L W Pai J. Phys. D: Appl. Phys. –2016. –V.49. –A:145004.
19. Julia R. Downing, Suok-Min Na, Alison Flatau. AIP Advances –2017. –V.7, –A:056420.
20. Holly M. Schurter and Alison B. Flatau, Proc. SPIE. –2008. –V.6929. –A:69291U
21. L. Anand, M. Kothari, J. Mech. Phys. Solids. –1996. –V.44. –P.525–558.
22. Abhishek Kumar, Veera Sundararaghavan Finite Elements in Analysis and Design. –2017. –V.127. –P.1-5.
23. R. Liu, A. Kumar, Z. Chen, A. Agrawal, V. Sundararaghavan, A. Choudhary, Nat. Sci. Rep. –2015. –V.5. –A:11551.
24. Abhishek Kumar, Veera Sundararaghavan Finite Elements in Analysis and Design. –2017. –V.127, –P.1-5.
25. J. Atulasimha, Smart Mater. Struct. –2007. –V.16, –P.1265-1276.
- 26 - B. Gobaut, G. Vinai, C. Castán-Guerrero AIP Advances. –2015. –V.5. –A:127128.
27. Yoanh Espinosa-Almeydaa, Héctor Camacho-Montesa, Mathematical Modeling in Micromechanics. –2017. –P.3320-3332.

28. А.А. Буш, К.Е. Каменцев, В.Ф. Мещеряков, Ю.К. Фетисов, Д.В. Чашин, Л.Ю. Фетисов Журнал технической физики. –2009. –т.79, –вып.9.
29. Brooks Muller¹, Michael N. Van Order, Suok-Min N, Alison B. Flatau AIP Advances. –2019. –V.9. –A:045113.
30. Ling Weng, Weina Li, Ying Sun, Wenmei Huang, and Bowen Wang Citation: AIP Advances. –2017. –V.7. –A:056023.
31. User's manual VSM 7000 series // Lake Shore Cryotronics, 2004
32. User's manual model 340 temperature controller // Lake Shore Cryotronics, 2004
33. А.В. Шапоров. Магниторезистивные свойства бинарных сплавов на основе железа и редкоземельных металлов. Москва, 2017, 24стр.