

УТВЕРЖДАЮ

Ректор УрГУ

\_\_\_\_\_ Д.В. Бугров

**Программа**  
**краткосрочного повышения квалификации преподавателей и научных**  
**работников высшей школы по направлению**  
**“ Магнитные наноматериалы и методы исследования ”**  
**на базе учебного курса**  
**«Магнитомягкие наноструктурированные сплавы и материалы на их**  
**основе»**

Цель изучение физических принципов технологии быстрой закалки и формирования магнитных свойств материалов с наноструктурными элементами

Категория слушателей преподаватели и научные работники высшей школы

Примерный срок обучения 36 часов

Форма обучения с частичным отрывом от работы, дистанционно- очная

Режим занятий 8 часов в день

*Целью данного курса* является ознакомление с новым классом металлических сплавов в особом структурном состоянии, характерным признаком которого является наличие структурных элементов наноразмерного масштаба. В очной части учебного курса запланировано проведение трех лабораторных работ, знакомящих слушателей с традиционными и современными методами исследования магнитных свойств материалов.

***Требования к уровню освоения учебного курса***

Преподаватели должны:

- Знать:
  - основные характеристики магнитных материалов;
  - основные параметры процесса быстрой закалки сплавов;
  - базовые составы для получения аморфных и нанокристаллических магнитно-мягких сплавов.
- Иметь навыки:
  - подготовки образцов к проведению измерений;

- обработки полученных результатов и формирования отчета;
- обобщения полученных экспериментальных данных с целью использования их в преподаваемых курсах дисциплин;
- Иметь представление:
  - о структурном состоянии аморфных и нанокристаллических сплавов;
  - о модели случайной анизотропии;
  - о принципе работы СКВИД-магнитометра.

Научные работники должны:

- Знать:
    - основные характеристики магнитных материалов и способы их измерения;
    - основные параметры процесса быстрой закалки сплавов и влияния последующей термообработки на их свойства;
    - базовые составы для получения аморфных и нанокристаллических магнитно-мягких сплавов и влияния добавок конкретных элементов на формирование нанокристаллической структуры.
  - Иметь навыки:
    - подготовки образцов и проведения измерений на установке контроля магнитных потерь, на вибромагнитометре и для проведения измерений на СКВИД магнитометре;
    - проведения термических и термомагнитных обработок образцов быстрозакаленных материалов;
    - обработки полученных результатов и формирования отчета;
  - Иметь представление:
    - о локальных параметрах структуры и анизотропии аморфных и нанокристаллических сплавов;
    - о модели случайной анизотропии;
    - о теории формирования наведенной анизотропии и взаимосвязи наведенной анизотропии и доменной структуры;
1. В предлагаемом учебном курсе наряду с общими вопросами физики магнитомягких материалов будут рассмотрены:
- методы получения и условия формирования аморфного и нанокристаллического состояния;
  - основные системы сплавов и практически важные материалы на их основе;
  - влияние химического состава и термообработки на параметры нанокристаллической структуры;
  - роль случайной магнитной анизотропии в формировании магнитных свойств;
  - методы исследования структуры и магнитных свойств;

- отечественные и зарубежные производители аморфных и нанокристаллических сплавов и номенклатура их продукции.

В очной части учебного курса запланировано проведение трех лабораторных исследовательских работ:

- изучение частотной и амплитудной зависимости магнитных потерь образцов аморфного и нанокристаллического сплавов на установке контроля динамических магнитных свойств – УКМП–0,05-100;
- применение метода корреляционной магнитометрии для исследования наноструктурированных материалов;
- знакомство с принципом работы и экспериментальными возможностями СКВИД магнитометра MPMS XL фирмы Quantum Design.

2. Дистанционная часть учебного курса состоит из пяти лекций.

**Лекция 1. Магнитные материалы.** Магнитные явления и магнитные характеристики вещества. Единицы измерения магнитных величин. Магнитное поле и магнитная индукция. Магнитные параметры намагничиваемых сред. Магнитно-мягкие материалы.

**Лекция 2. Методы получения и микроструктура аморфных материалов.** Получение и микроструктура аморфных сплавов. Метод быстрой закалки. Модели структуры аморфных сплавов. Магнитные свойства. Экспериментальное изучение структурной неоднородности.

**Лекция 3. Методы получения и микроструктура нанокристаллических материалов.** Получение и микроструктура нанокристаллических материалов. Влияние химсостава на микроструктуру и магнитные свойства нанокристаллического сплава Fe-Cu-Nb-Si-B. Результаты рентгенографических и электронномикроскопических исследований. Модель формирования нанокристаллической структуры.

**Лекция 4. Магнитная анизотропия и межзеренное обменное взаимодействие.** Модель случайной анизотропии. Закон  $D^6$  для коэрцитивной силы. Влияние температуры на магнитные свойства. Наведенная анизотропия и практически важные магнитные свойства. Сравнение магнитных свойств со свойствами традиционных кристаллических материалов.

**Лекция 5. Изучение структуры нанокристаллического сплава методом корреляционной магнитометрии.** Закон приближения намагниченности к насыщению. Метод корреляционной магнитометрии. Методика определения и расчета локальных параметров. Формирование структуры в процессе изохронного и изотермического нанокристаллизационного отжига.

3. На дистанционную часть учебных курсов отводится 12 часов, на очную часть отводится 24 часа.



кристаллизация сплава;  
2) температура, при которой происходит затвердевание расплава без его кристаллизации;  
Ответ:

эвтектическое превращение в сплаве;  
4) температура, при которой происходит атомное упорядочение в сплаве;

**2. К преимуществам аморфных сплавов как магнитно-мягких материалов относится (в ответе укажите сумму номеров правильных ответов):**

- |   |  |
|---|--|
| 1) отсутствие кристаллографической анизотропии; | 3) повышенное удельное электрическое сопротивление;                  |
| 2) наличие температуры кристаллизации;          | 4) пониженные значения намагниченности насыщения и температуры Кюри. |

Ответ:

**3. Минимальная скорость охлаждения расплава при аморфизации составляет:**

- |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1) $10^{10} - 10^{12}$ К/с; | 3) $10^2 - 10^3$ К/с;       |
| 2) $10^5 - 10^6$ К/с;       | 4) $10^{-5} - 10^{-6}$ К/с; |

Ответ:

**4. Для эвтектических сплавов данной системы характерным является:**

- |  |  |
|--|--|
| 1) повышенные значения температуры плавления ; | 3) повышенные значения температуры полиморфного превращения; |
| 2) пониженные значения температуры плавления;  | 4) пониженные значения температуры полиморфного превращения; |

Ответ:

**5. Метод корреляционной магнитометрии основывается:**

- |  |   |
|--|---|
| 1) на измерении температурных зависимостей спонтанной намагниченности;   | 3) на измерении кривых вращающих механических моментов;                             |
| 2) на измерении кривых намагничивания в области начальной проницаемости; | 4) на измерении кривых намагничивания в области приближения к магнитному насыщению; |

Ответ:

### Лекция 3: Методы получения и микроструктура нанокристаллических магнитных материалов

**1. Кристаллическая фаза сплава *файнмет* состоит из нанозерен состава:**

- |                                      |                             |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| 1) $\alpha - \text{Fe}(\text{Si})$ ; | 3) $\text{Fe}_3\text{Si}$ ; |
| 2) $\text{Fe}_{23}\text{B}_6$ ;      | 4) $\text{Fe}_2\text{B}$ ;  |

Ответ:

**2. Атомы Nb в процессе кристаллизации выполняют роль:**

- |   |   |
|---|---|
| 1) регулятора однородности размера зерен; | 3) ингибитора роста зерен;  |
| 2) центров зарождения кристаллов;         | 4) регулятора соотношения объемов кристаллической и аморфной фаз. |

Ответ:

**3. Атомы Si в процессе кристаллизации выполняют роль:**

- |   |   |
|---|---|
| 1) регулятора однородности размера зерен; | 3) ингибитора роста зерен;  |
| 2) центров зарождения кристаллов;         | 4) регулятора соотношения объемов кристаллической и аморфной фаз. |

Ответ:

**4. Высокий уровень магнитных свойств сплава файнмет обусловлен следующим сочетанием констант нанокристаллической фазы:**

- |  |  |
|--|--|
| 1) малой константой магнитной анизотропии и большой величиной константы магнитострикции; | 3) малой константой магнитной анизотропии и малой величиной константы магнитострикции;     |
| 2) большой константой магнитной анизотропии и малой величиной константы магнитострикции; | 4) большой константой магнитной анизотропии и большой величиной константы магнитострикции; |

Ответ:

#### Лекция 4. Магнитная анизотропия и межзеренное обменное взаимодействие

**1. Критерием реализации межзеренного обменного взаимодействия в рамках модели случайной анизотропии является следующее соотношение:**

- |                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| 1) $D \gg L_{ex,0}$ ; | 3) $D \sim L_{ex,0}$ ; |
| 2) $D \ll L_{ex,0}$ ; |                        |

Ответ:

**2. Температура Кюри аморфной фазы в сплаве файнмет составляет:**

- |            |            |
|------------|------------|
| 1) 120 °С; | 3) 320 °С; |
| 2) 220 °С; | 4) 420 °С; |

Ответ:

**3. Укажите функциональную связь между коэрцитивной силой и размером зерна в области размеров меньше 1 мкм:**

- |                     |                        |
|---------------------|------------------------|
| 1) $H_c \sim D^6$ ; | 3) $H_c \sim D^{-3}$ ; |
| 2) $H_c \sim D^3$ ; | 4) $H_c \sim D^{-6}$ . |

Ответ:

**4. В чем состоит физическая причина низкой магнитной анизотропии в нанокристаллическом сплаве?**

- |  |  |
|--|--|
| 1) в малой величине константы магнитострикции аморфной фазы;             | 3) в малой величине константы магнитной анизотропии нанокристаллических зерен; |
| 2) в малой величине константы магнитострикции нанокристаллических зерен; | 4) в наличии обменного взаимодействия между нанокристаллическими зёрнами;      |

Ответ:

#### Лекция 5. изучение структуры нанокристаллического сплава методом корреляционной магнитометрии

**1. Какие параметры могут быть определены с помощью корреляционной магнитометрии?**

- |  |  |
|--|--|
| 1) размер зерна и константа естественной кристаллографической анизотропии;         | 3) размер зерна и константа обменного взаимодействия;                      |
| 2) константа локальной магнитной анизотропии и радиус корреляции осей анизотропии; | 4) константа локальной магнитной анизотропии и спонтанная намагничённость; |

Ответ:

**2. Корреляционное поле осей анизотропии определяют по смене вида полевой**

**зависимости:**

- 1) от  $H^1$  к  $H^2$ ;  
2) от  $H^{3/2}$  к  $H^2$ ;

- 3) от  $H^{1/2}$  к  $H^{3/2}$ ;  
4) от  $H^{1/2}$  к  $H^2$ .

Ответ:

**3. Спонтанная намагниченность определяется**

- 1) и температурой и намагничивающим полем;  
2) только намагничивающим полем;

- 3) не зависит ни от температуры, ни от намагничивающего поля;  
4) только температурой.

Ответ:

**4. Намагниченность насыщения определяется**

- 1) и температурой и намагничивающим полем  
2) только намагничивающим полем

- 3) не зависит ни от температуры, ни от намагничивающего поля  
4) только температурой

Ответ:

**Контрольные вопросы**

1. Назвать характерные признаки магнитно-мягких материалов.
2. В чем состоит явление магнитной анизотропии?
3. Показать, что единица магнитной индукции, выраженная через основные единицы СИ, одинакова для обоих способов измерения (с помощью измерения ЭДС и с помощью измерения силы).
4. Найти переводные коэффициенты из СИ в СГСМ для В, J, H.
5. Охарактеризуйте методику быстрой закалки и назовите условия получения аморфного состояния при получении аморфных сплавов
7. Опишите процессы, отображенные на диаграмме температура–время–превращение.
8. В чем состоит явление структурной наследственности в аморфных сплавах?
9. В чем состоит явление структурной релаксации?
10. Дайте определение нанокристаллического состояния твердых тел.
11. В чем состоит роль меди и ниобия в формировании нанокристаллического структурного состояния?
12. В чем состоит роль кремния?
13. Опишите последовательность стадий при формировании нанокристаллической структуры.
14. В чем причина околонулевых значений магнитострикции нанокристаллического сплава finemet?
15. Укажите функциональную связь между коэрцитивной силой и размером зерна в области размеров меньше 1 мкм.
16. В чем состоит физическая причина низкой магнитной анизотропии в нанокристаллическом сплаве?
17. Какова роль межзеренной фазы в формировании уровня магнитных свойств в нанокристаллическом сплаве?
18. В чем состоит механизм наведения одноосной анизотропии в процессе ТМО?
19. Чем обусловлено различие формы петли гистерезиса после продольной и поперечной термомагнитной обработки?
20. Чем обусловлена температурная стабильность магнитных свойств нанокристаллического сплава?
21. Каковы физические причины, приводящие к зависимости намагниченности от поля в области приближения к насыщению?

22. В чем состоит суть метода корреляционной магнитометрии и какие параметры могут быть определены с его помощью?
23. Назовите условия применимости метода корреляционной магнитометрии.
24. Какова связь между структурными параметрами и локальными параметрами магнитной структуры?
25. Какие структурные процессы происходят при формировании нанокристаллической структуры во время изотермического отжига?

#### 4.2. Учебно-тематический план

№	Название учебного курса и лекций	Всего, час.	в том числе (указать часы)			Форма контроля
			Дистанционные лекции (самостоятельное изучение, дистанционное общение с преподавателем, вопросы-ответы через email, форум, чат и д.)	Самостоятельная работа. Подготовка ответов на контрольные вопросы	Очный практикум или другое практическое задание	
	«Магнитомягкие наноструктурированные сплавы и материалы на их основе»	36 ч.	10 ч.	2 ч.	24 ч.	Контрольные вопросы (электронная зачётка)
1.	Лекция 1: Магнитные материалы		2 ч.	0,25 ч.		
2.	Лекция 2: Методы получения и микроструктура аморфных материалов		2 ч.	0,25 ч.		
3.	Лекция 3: Методы получения и микроструктура нанокристаллических материалов		2 ч.	0,5 ч.		
4.	Лекция 4: Магнитная анизотропия и межзеренное обменное взаимодействие		2 ч.	0,5 ч.		
5.	Лекция 5: Изучение структуры нанокристаллического сплава методом корреляционной магнитометрии		2 ч.	0,5 ч.		
	Итоговый контроль			Контрольные вопросы (электронная зачётка)	отчет	

#### 4.3. Список литературы

##### Основной

Д. Камке, К. Кремер. Физические основы единиц измерения/ пер. с нем. п/ред. А.Н. Матвеева.- М: Мир. 1980.-208 с.

Х. Кухлинг. Справочник по физике/ пер. с нем. Е.М. Лейкина.-М: Мир. 1982.-520 с.



Средства измерений параметров магнитного поля /Ю.В. Афанасьев и др.- Л.: Энергия, 1979.-320 с.

Хандрих К., Кобе С. Аморфные ферро- и ферритмагнетики.: Пер. с нем.- М.: Мир, 1982.- 296 с.

Сузуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. – М.: Металлургия, 1987. – 328 с.

Металлические стекла. Вып. II: Атомная структура и динамика, электронная структура, магнитные свойства./ Под ред. Г. Бека и Г. Гюнтеродта.- М.: Мир, 1986.- 456 с.

Suzuki K. Processing and modeling of novel nanocrystalline soft magnetic materials // Handbook of advanced magnetic materials. – V.1. – Springer US, 2006– P. 339-373.

Herzer G. Nanocrystalline soft magnetic alloys // Handbook of magnetic materials.– V.10 – Elsevier Science, 1997 – P. 415-462.

Золотухин И.В. Аморфные металлические материалы. Соросовский образовательный журнал. – №4, 1997. – С. 73-78.

Золотухин И.В. Нанокристаллические материалы. Соросовский образовательный журнал. – №1, 1998. – С. 103-106.

### Дополнительный

Цепелев В.С., Баум Б.А., Кулешов Б.М., Третьякова Е.Е., Тягунов Г.В. Оптимизация подготовки расплава перед аморфизацией // Сталь. – 1993. – №12. – С.54-59.

Катаев В.А., Летов М.В., Стародубцев Ю.Н., Цепелев В.С., Кузеванова Л. А. Структурная наследственность в аморфном сплаве  $Fe_{81}V_{13}Si_4C_2$ . // ФММ. – 2001. – Т.92, Вып.2. – С.21-25.

Стародубцев Ю.Н., Сон Л.Д., Цепелев В.С., Тягунов Г.В., Тишкин А.П., Коробка О.Б. Влияние температуры нагрева расплава на механические и магнитные свойства аморфной ленты // Расплавы. – 1992. – №4. – С.76-79.

Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure // J. Appl. Phys. – 1988. – V. 64, №10. – P. 6044-6046.

Makino A., Suzuki K., Inoue A., Hirotsu Y., Masumoto T. // J. Magn. Magn. Mater. – 1994. – V.133. – P. 329.

Willard M. A., Laughlin D. E., McHenry M. E. Thoma D., Sickafus K., Cross J. O., and Harris V. G. // J. Appl. Phys. – 1998 – V. 84– P. 6773.

J. Olszewsky et al. Transformation from amorphous to nanocrystalline state in FeNbZrBCu alloys. – JMMM.– 2002. – 241. – P.381-389.

Flohrer S. et al. Interplay of uniform and random anisotropy in nanocrystalline soft magnetic alloys // Acta Materialia. – 2005. –V. 53. – 2937-2942.

Игнатченко В.А., Исаков Р.С., Попов Г.В. Закон приближения намагниченности к насыщению в аморфных ферромагнетиках // ЖЭТФ – 1982. – Т. 82, Вып.5. – С. 1518-1531.

Chudnovsky E M, Serota R A. Phenomenological theory of amorphous magnets with small random anisotropy//The institute of Physics.-1983.-№16.-4181-4190

Игнатченко В.А., Исаков Р.С. Стохастические свойства неоднородностей аморфных магнетиков // Магнитные свойства кристаллических и аморфных сред. – Новосибирск: . – 1989. – С.128-147.

Катаев В.А., Летов М.В., Иванов О.А. Исследование формирования нанокристаллической структуры сплава Finemet методом корреляционной магнитометрии (II) //ФММ – 1999. – Т.87, В.1. – С. 40-44.

Полное содержание лекций в электронной дистанционной части учебного курса на сайте [www.nanoobr.ru](http://www.nanoobr.ru)