



3-я Всероссийская научная конференция
Методы исследования состава и структуры функциональных материалов

МИССФМ-2020

Новосибирск, 1-4 сентября 2020 года



СД-27

**ИССЛЕДОВАНИЕ
НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ
ОБЪЕМНЫХ СПЛАВОВ $(\text{Co-P})_{100-x}\text{Cu}_x$
МАГНИТОСТРУКТУРНЫМИ МЕТОДАМИ**

**Кузовникова Людмила Александровна¹, Денисова Е.А.^{2,3}, Немцев И.В.⁴,
Исхаков Р.С.², Кузовников А.А.¹, Мальцев В.К.², Шепета Н.А.³**

¹Красноярский институт железнодорожного транспорта, Красноярск, Россия

²Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск, Россия

³Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

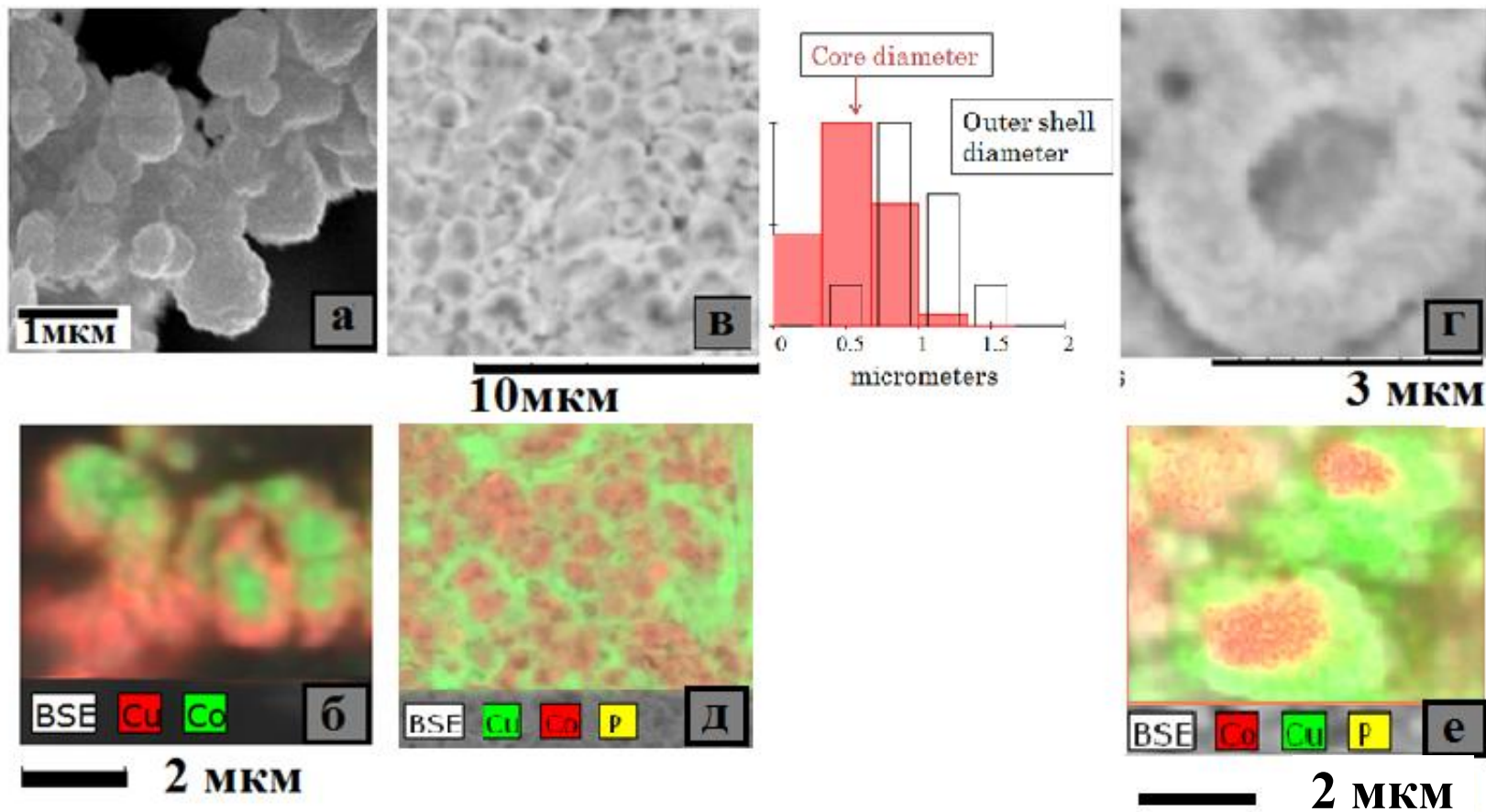
⁴КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия

- **Проведены магнитоструктурные исследования объемных наноструктурированных композиционных материалов Co-P/Cu, изготовленных методом динамического компактирования. Исходные частицы типа «ядро-оболочка» были синтезированы методом химического осаждения. Определены характеристики магнитной микроструктуры полученных материалов. Показано, что использование композиционных частиц позволяет получать массивные материалы с сохранением структуры и основных магнитных характеристик исходных порошков.**

Синтез при воздействии ударных волн представляет интерес с точки зрения получения массивных материалов с фазами в метастабильном состоянии. Механическое воздействие ударной волны создает условия как для размельчения исходных веществ, так и для синтеза конечных продуктов. После прохождения ударной волны происходит быстрое охлаждение материала при этом стабилизируются высокотемпературные и метастабильные кристаллические модификации.

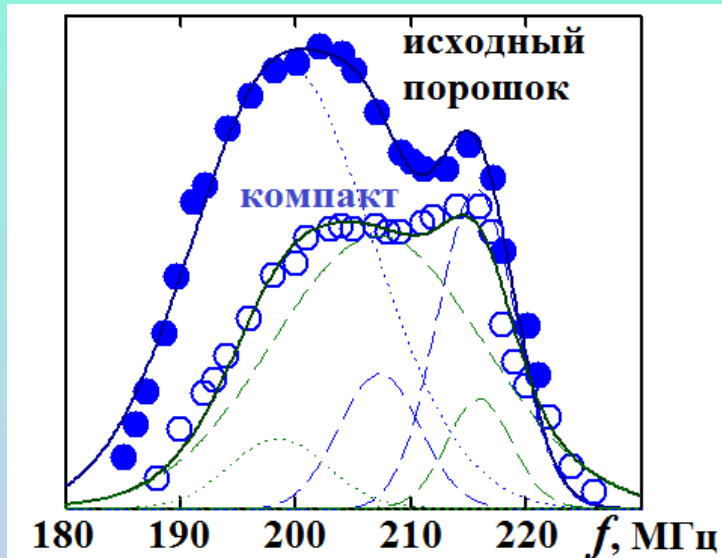
Эксперимент

- В качестве прекурсоров для динамического компактирования использовались порошки с композиционными частицами типа «ядро-оболочка», которые были синтезированы методом химического осаждения с гипофосфитом натрия в качестве восстановителя.
- В качестве ядра для образцов $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{100-x}/\text{Cu}_x$ использовались частицы $\text{Co}(\text{P})$ с содержанием фосфора 12 ат. %, находящиеся в аморфном состоянии, на которые затем была нанесена кристаллическая оболочка из меди различной толщины.
- Композиционные частицы имеют сферическую форму для всех исследуемых концентраций фосфора и меди, толщина слоя меди (в зависимости от ее содержания) изменялась от 0,05 мкм для порошков $(\text{Co-P})_{80}/\text{Cu}_{20}$ до 0,8 мкм для $(\text{Co-P})_{10}/\text{Cu}_{90}$.
- Полученные композиты изучались методами рентгеновской дифракции и электронной микроскопии (РЭМ Hitachi TM-3000). Объемные образцы были изготовлены методом динамического компактирования при плоской схеме прессования.

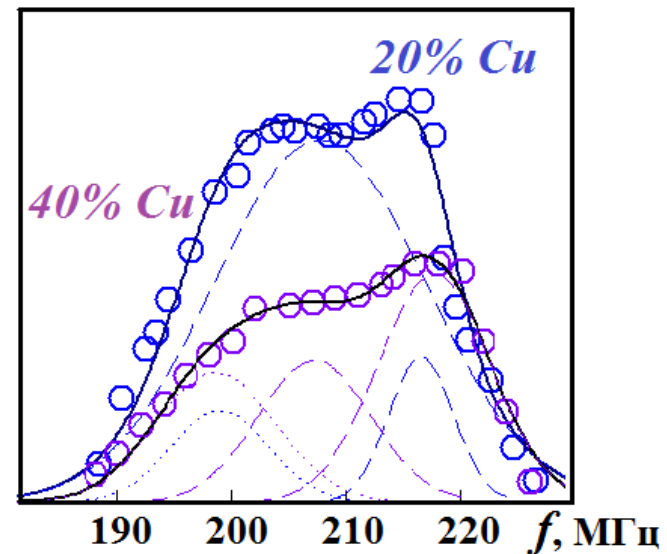


РЭМ - изображения композиционных частиц порошка $\text{Co}_{88}\text{P}_{12}/\text{Cu}$ (a) и EDX карта распределения элементов в частицах порошка (б); шлифов объемных образцов $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{80}/\text{Cu}_{20}$ (в) и $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{30}/\text{Cu}_{70}$ (z), изготовленных динамическим компактированием частиц $\text{Co}_{88}\text{P}_{12}/\text{Cu}$, и EDX карты распределения меди и кобальта в прессовке (д, е) .

Ядерный магнитный резонанс



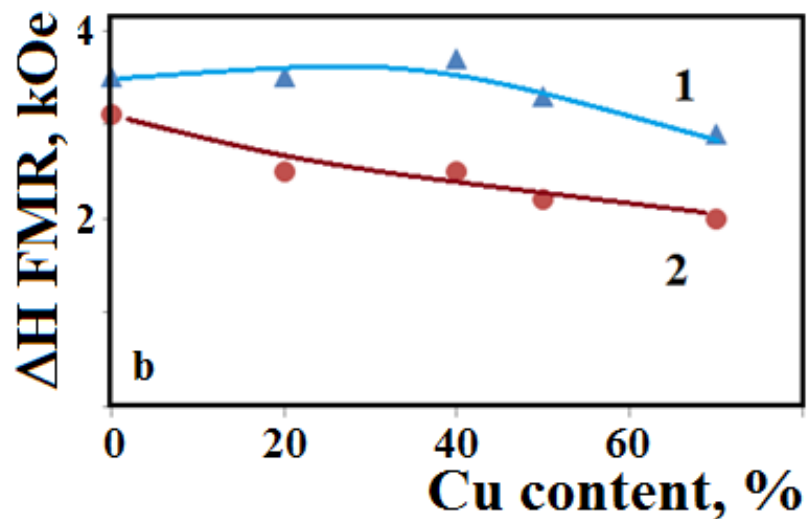
Спектры ЯМР исходного порошка $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{80}/\text{Cu}_{20}$ и прессовки, полученной методом динамического компактирования



Спектры ЯМР прессовок $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{100-x}/\text{Cu}_x$ с различным содержанием меди

Методом ЯМР установлено, что в частицах исходных порошков большинство атомов кобальта имеют ближайшее окружение ГЦК-типа с небольшим количеством ГПУ-позиций. УВН приводит к более однородному состоянию сплава $\text{Co}(\text{P})$ и возрастанию числа атомов кобальта с ГПУ-типом ближайшего окружения. На рисунке представлены спектры ЯМР, записанные при $T = 77 \text{ K}$ для компактов с различной толщиной медной оболочки. Наблюдаемая форма спектров ЯМР для объемных образцов всех составов указывает на гетерофазное строение ферромагнитной $\text{Co}(\text{P})$ фазы: сосуществуют атомы кобальта с ГПУ- и ГЦК-типами ближайшего окружения. Отношение количества атомов с ГПУ- и ГЦК-симметрией ближайшего окружения несколько различно для компактов с различной толщиной медной оболочки. С увеличением содержания меди растет доля атомов кобальта с ГЦК-симметрией ближайшего окружения.

Ферромагнитный резонанс



Ширина линии ФМР исходных порошков $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{100-x}/\text{Cu}_x$ (1) и прессовок (2)

Ударно волновое нагружение вызывает сужение линии ФМР

Образцы для измерения кривых намагничивания и ФМР были вырезаны из прессовок в виде плоскопараллельных пластинок с размерами $3 \times 7 \times 1$ мм. Оказалось, что кривые намагничивания, измеренные при взаимно перпендикулярных направлениях внешнего поля относительно пластинки, практически совпадают, так же, как и спектры ферро-магнитного резонанса, записанные при различных ориентациях образца относительно внешнего поля. Следовательно, в случае композиционных объемных образцов $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{100-x}/\text{Cu}_x$ диполь-дипольное взаимодействие не определяет форму кривой намагничивания для всех исследуемых значений x . Основной вклад в случае компактов $\text{Co(P)}/\text{Cu}$ вносит анизотропия формы Co(P) частиц.

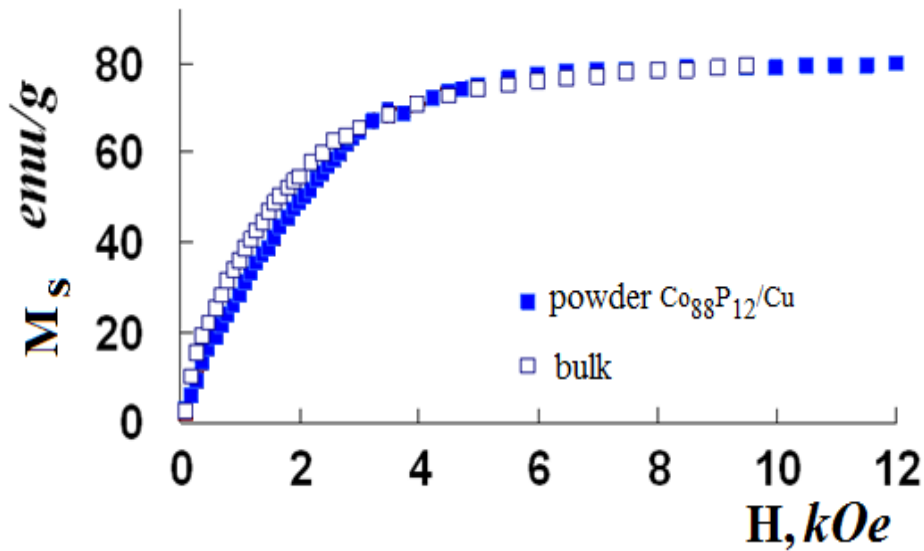
Корреляционная магнитометрия

Параметры магнитной микроструктуры (размер области магнитных корреляций, так называемого стохастического магнитного домена и эффективная анизотропия в них, пространственная размерность спиновой системы) рассчитывали, используя развитый на основе модели случайной анизотропии метод корреляционной магнитометрии, основанный на изучении закона приближения намагниченности к насыщению (ЗПН)
Игнатченко В.А., Исхаков Р.С. // ФММ. 1992. № 6. С. 75.

Метод основан на исследовании закона приближения намагниченности к насыщению. После учета размагничивающего поля гранул ($4\pi M_s/3$) наилучшей подгонкой кривых приближения намагничивания к насыщению в этих материалах является ЗПН вида:

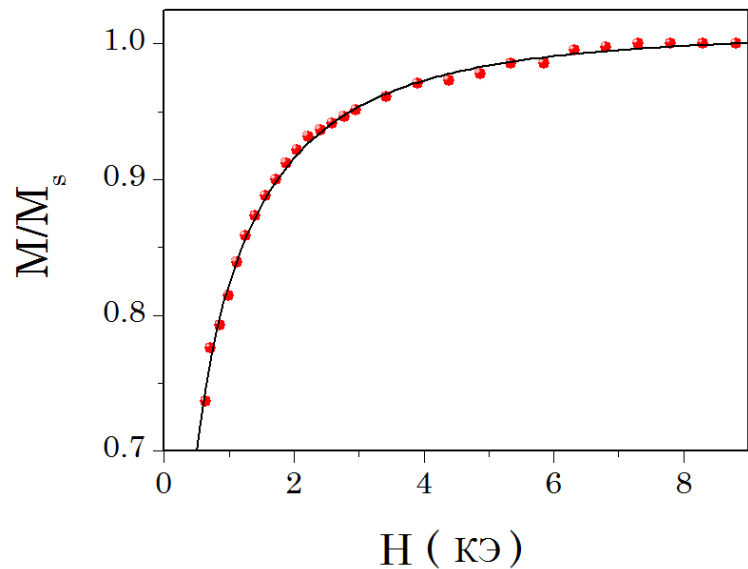
$$\bullet \quad M(H) = M_s \cdot \left(1 - 1/15 \cdot H_a^2 \cdot H^{-1/2} \cdot \left(H^{3/2} + H_R^{3/2} \right)^{-1} \right) \quad (1)$$

где $H_a = 2K/M_s$ – поле локальной магнитной анизотропии, $H_R = 2A/M_s R_c^2$ обменное корреляционное поле выше которого справедлив закон Акулова, а ниже реализуется степенная зависимость вида H^{-n} , с показателем, зависящим от размерности неоднородности анизотропии.



Типичные кривые
намагничивания исходных
порошков $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{100-x}/\text{Cu}_x$ и
прессовок

- Исследование кривых приближения намагниченности к насыщению показало, что в области больших полей (в полях больше 5 кЭ) для всех величин x исследуемых исходных порошков и компактов $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_x/\text{Cu}_{100-x}$ кривые намагничивания хорошо следуют закону Акулова ($\Delta M \sim H^{-2}$), а в меньших полях испытывают кроссовер ($\Delta M \sim H^{-0,5}$). Это позволило определить величину поля локальной анизотропии H_a и радиус ее пространственной корреляции R_c . Установлено, что ударно-волновое нагружение композиционных частиц в момент компактирования приводит к уменьшению значения поля локальной анизотропии с 3,8 кЭ до 3 кЭ, значение коэрцитивной силы практически не изменяется ($H_c \sim 200 \text{ Э}$).



- Кривая намагничивания для объемного образца $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{80}/\text{Cu}_{20}$. Линией показан результат подгонки формулой (1).
- $H_a = 2K/M_s$ – поле локальной магнитной анизотропии, $H_R = 2A/M_s R_c^2$ обменное корреляционное поле

Характеристики магнитной микроструктуры компактов $(\text{Co}_{88}\text{P}_{12})_{100-x}/\text{Cu}_x$

Весовая доля меди, %	aH_a , КЭ	H_R , КЭ	$\langle aH_a \rangle$, Э	R_f , нм
0	2,1	6,2	82	55
20	0,9	2,3	60	70
40	1,4	3,1	130	45
50	0,8	1,4	140	47
70	0,8	1,5	120	45

В таблице представлены значения величин поля локальной анизотропии aH_a , корреляционного поля H_R , поля анизотропии стохастического домена $\langle aH_a \rangle$ и его размера R_f .

Заключение

- Методом динамического компактирования получены объемные наноструктурированные композиционные материалы Co-P/Si с таким же значением намагниченности насыщения, как и у исходного порошка. Как в исходных порошках, так и в компактах сплав $\text{Co}_{88}\text{P}_{12}$ представляет собой гетерофазную систему, а, именно, смесь фаз с ГЦК и ГПУ ближним порядком. Методом корреляционной магнитометрии определены значения поля локальной анизотропии, поля анизотропии стохастического домена и его размера. Установлено, что ударно-волновое нагружение в процессе компактирования образцов вызывает уменьшение значения поля локальной анизотропии и величин коэрцитивной силы и ширины линии ФМР.