

ОТЗЫВ
официального оппонента
на диссертацию МОГИЛЬНИКОВА Павла Сергеевича
«Закономерности влияния процессов структурной релаксации на магнитные свойства и механическое поведение аморфных сплавов на основе кобальта с очень низкой магнитострикцией ($\lambda_s < 10^{-7}$), представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния

Магнитно-мягкие аморфные сплавы на основе железа или кобальта являются практически единственным примером широкого промышленного применения аморфных сплавов (в основном сердечники для преобразования тока или напряжения на высоких и сверхвысоких частотах). Уже с этой точки зрения тема диссертации П.С. Могильникова является актуальной, несмотря на то, что эти аморфные сплавы созданы и освоены в 70-80 годах прошлого века. Актуальность этой темы не ослабевает подобно актуальности исследований конструкционных сталей. Но работа П.С. Могильникова актуальна и с чисто научной точки зрения. В отличие от сталей, атомное строение аморфных металлических сплавов до сих пор остается предметом острых научных дискуссий: возможности современного дифракционного эксперимента позволяют оценить лишь среднее межатомное расстояние и зафиксировать отсутствие дифракции. Нет теоретических моделей, описывающих размещение атомов в отсутствии дальнего порядка, и одновременно объясняющих высокую плотность упаковки атомов в аморфных сплавах — она практически такая же, как в кристаллических сплавах. В такой ситуации огромное значение имеет измерение физических свойств при воздействиях внешних факторов, своеобразная «металлография без микроскопа», поскольку эти данные могут дать указания к построению адекватных структурных моделей аморфного состояния в металлах. Это и определяет научную актуальность темы рецензируемой диссертации.

Наиболее сложными с точки зрения наблюдения и теоретического описания являются физические процессы в аморфных сплавах задолго до начала их кристаллизации при нагреве — процессы атомной структурной релаксации. Поэтому в качестве общей цели диссертационной работы П.С. Могильникова было наблюдение формирования магнитных, и одновременно механических свойств кобальтового аморфного сплава с особо низкой константой магнитострикции в процессе отжига в области сохранения аморфного состояния. Основным объектом исследования был выбран сплав на основе кобальта состава (в ат.%) $\text{Co}_{69}\text{Fe}_{3,7}\text{Cr}_{3,8}\text{Si}_{12,5}\text{B}_{11}$ с магнитострикцией менее 10^{-7} , а также другие аморфные сплавы с малой магнитострикцией:

$\text{Co}_{80}\text{Mo}_{10}\text{Zr}_{10}$, $\text{Co}_{80}\text{Ni}_2\text{Mo}_8\text{Zr}_{10}$, $\text{Co}_{58}\text{Fe}_5\text{Ni}_{10}\text{Si}_{11}\text{B}_6$. Для сравнения исследованы аморфные сплавы на основе железа с более высокой магнитострикцией $(2,5-3,5) \cdot 10^{-6}$: $\text{Fe}_{81}\text{Si}_4\text{B}_{13}\text{C}_2$, $\text{Fe}_{57}\text{Co}_{31}\text{Si}_{2,9}\text{B}_{9,1}$, $\text{Fe}_{78}\text{Ni}_1\text{Si}_8\text{B}_{13}$.

Диссертант поставил в этих рамках частные задачи, которые включали выявление стабилизации доменных границ, направленного упорядочения и образования кластеров в процессе изохронного отжига, и влияние этих факторов на результирующие магнитные свойства, шумы Баркгаузена, формирование свойств под действием отжига в магнитном поле. Особое внимание в работе уделено влиянию изгибных напряжений на динамические гистерезисные свойства на разных частотах, явлению обратимости остаточных изгибных напряжений (это явление обнаружено в настоящей работе). В связи с этим изучено также влияние амплитуды исходных изгибных напряжений на их релаксацию в процессе отжига аморфных сплавов. Рассмотрены также закономерности охрупчивания, возможные приемы борьбы с этим явлением, и наконец, влияние чисто технологических факторов (скорости и температуры разлива) на магнитные свойства и качество поверхности аморфного сплава с близкой к нулю магнитострикцией.

Выбранные методы исследования магнитных и механических характеристик адекватны поставленным задачам. Релаксацию изгибных напряжений исследовали при навивании аморфной ленты на цилиндрическую оправку, остаточную пластичность оценивали 180-градусному изгибу между параллельными пуансонами.

Среди наиболее интересных и новых результатов, полученных П.С. Могильниковым, считаю необходимым отметить следующие:

- впервые наблюдавшееся влияние структурной релаксации на характеристики магнитных шумов, обусловленных скачками Баркгаузена;
- выявление закономерностей влияния изгибных напряжений на динамические коэрцитивную силу и магнитную проницаемость (на частотах от 0,1 до 20 кГц). Среди этих закономерностей надо выделить впервые обнаруженную аномалию: увеличение проницаемости с увеличением изгибных напряжений;
- обнаружение максимума на зависимости динамической магнитной проницаемости от температуры и времени выдержки отжига в поперечном магнитном поле;
- обнаружение явления обратимости остаточных изгибных напряжений в процессе отжига (самопроизвольное выпрямление свободной от нагрузки ленты).

Практическая значимость полученных П.С. Могильниковым результатов и сделанных обобщений заключается в следующем:

- сформулированы принципы выбора режимов термической обработки, обеспечивающих оптимальные магнитные свойства сплава особо низкой магнитострикцией;
- зафиксировано, что изученный сплав $\text{Co}_{69}\text{Fe}_{3.7}\text{Cr}_{3.8}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{11}$ обладает сравнительно низким уровнем магнитных шумов. Установлена принципиальная возможность создания состояний, которым отвечают приемлемые гистерезисные магнитные свойства в сочетании с низкими магнитными шумами;
- обнаружены закономерности влияния величины изгибных напряжений на динамические магнитные характеристики гистерезиса в широком диапазоне частот внешнего магнитного поля;
- на основе данных по влиянию времени выдержки при отжиге на развитие процесса охрупчивания установлены режимы отжига, обеспечивающие получение оптимальных гистерезисных магнитных свойств без перевода сплава в хрупкое состояние.

Автореферат и публикации соответствуют диссертации и полностью отражают ее содержание.

По работе следует высказать несколько замечаний.

1. Основная общая цель всего исследования: выяснить «могут ли сплавы на основе кобальта с очень низкой магнитострикцией насыщения... обладать специфическими свойствами, отличными от свойств аморфных сплавов с более высокой магнитострикцией» (стр.50 диссертации). Однако, в выводах по диссертации мы нигде не находим ответа на этот вопрос, нигде прямо не сказано – такое-то явление, такая-то комбинация свойств не встречается у сплавов с более высокой магнитострикцией. Надо сказать, что в целом работа конечно выполнена, диссертант получил много оригинальных результатов, есть впервые открытые явления, но в чем специфика сверхнизкой магнитострикции, не сказано. Нет, кстати, и количественного критерия «очень низкой магнитострикции».

2. Весь пункт 1 общих выводов по диссертации (с.186) является качественной структурной интерпретацией наблюдаемых изменений физических свойств. Эта интерпретация логичная, имеет право на существование, но начинать этот раздел словами «показано, что» а дальше перечислять виды локальной атомной перестройки нет никаких оснований. В этом же стиле написан п.3 выводов: «Получено экспериментальное доказательство того, что изотропный композиционный ближний порядок вносит свой вклад в формирование ГМС в аморфных сплавах на основе

кобальта». Диссертант не дает себе труда указать в этом важно пункте, в чем состоит это экспериментальное доказательство.

3. Среди частных поставленных задач есть пункт 3: «Выявление влияния кластеринга, обусловленного изотропным композиционным ближним упорядочением, на ГМС». Ближнее упорядочение это и есть образование некоего кластера, т.е. получилось, что образование кластера обусловлено образованием кластера (я здесь не хочу использовать неудачную кальку английского “clustering”).

Высказанные замечания не могут изменить общую положительную оценку работы П.С. Могильникова, выполненной на высоком научном уровне и содержащей оригинальные физические результаты, имеющие также и практическое значение. Эта работа отвечает всем критериям Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 г. № 842 (пункты 9-14), предъявляемым к кандидатским диссертациям, поэтому П.С. Могильников заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент, профессор, д.т.н.

Крапошин Валентин Сидорович

29.11.2016

105005 Москва, 2-я Бауманская ул.,5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, профессор кафедры «Материаловедение», тел. 8-499-267-0071, miDMT-8@yandex.ru

