

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Елены Сергеевны САВЧЕНКО  
«ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СПЛАВА  
 $\text{Fe}_2\text{NiAl}$  ПОСЛЕ ЛИТЬЯ И ЗАКАЛКИ ИЗ РАСПЛАВА», представленную на  
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по  
специальности

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Постоянные магниты занимает важнейшее место в современной технике в качестве функциональных материалов, не менее важное, чем трансформаторная сталь или медь в электротехнике, хотя по общему потребляемому весу постоянные магниты значительно уступают сердечникам трансформаторов или электропроводам. Но не только это определяет актуальность темы диссертационной работы Е.С. Савченко. Объектом исследования ее диссертации является давно известный и хорошо освоенный в производстве высококоэрцитивный сплав тройной системы Fe-Ni-Al (сплав типа альни). В качестве одного из основных методов исследования в диссертации Е.С. Савченко использован метод просвечивающей электронной микроскопии тонких фольг, для исследования процессов распада и формирования высококоэрцитивного состояния в сплавах типа альни это сделано впервые в мировой литературе. Это значительно усиливает актуальность темы диссертации Е.С. Савченко. В настоящее время прогресс в развитии новых материалов для постоянных магнитов существенно замедлился, в поисках новых возможностей повышения гистерезисных характеристик магнитов и создания новых материалов исследователи обратились к традиционным материалам, но на современном экспериментальном уровне. В высококобальтовом сплаве Алнико 8 (следствие развития сплавов альни) методом высокоразрешающей электронной микроскопии уже получены новые принципиальные результаты. Исследование этих сплавов актуально еще и потому, что они не содержат дорогостоящих редкоземельных элементов. В совокупности этих соображений следует признать тему и объект диссертационной работы Е.С. Савченко чрезвычайно актуальной.

Наряду с просвечивающей электронной микроскопией для исследования ранних стадий распада исходного твердого раствора на сильномагнитную и слабомагнитную фазы в этой диссертации использован целый комплекс методов современного физического металловедения: растровой электронной микроскопии, дифференциальной сканирующей калориметрии, ЯГР, магнитометрии, включая термомагнитный анализ, измерение петель гистерезиса в частных и полных циклах, а также кривых



магнитного возврата. В части просвечивающей электронной микроскопии эта работа повторяет и развивает исследования, выполненные Ю.А. Скаковым в 1951 году методом электронной микроскопии углеродных реплик, что придает дополнительную ценность полученным Е.С. Савченко результатам. Распад твердого раствора исследован после стандартной термообработки (охлаждение с критической скоростью), а также с прерыванием критического охлаждения при разных температурах (закалкой от разных температур), или после резкой закалки до комнатной температуры и отпуска. Удачный выбор вариантов термообработки вместе с современными методами исследования обеспечил успех работы: получены результаты, расширяющие наши физические представления о спинодальном распаде, создающие основу для оптимизации технологии обычной и термоманитной обработки не только сплавов альни, но и более легированных, содержащих кобальт сплавов типа ЮНД24 и ЮНДК35. Некоторые результаты получены впервые (наряду с первым исследованием этого сплава в электронном микроскопе на просвет).

Среди интересных оригинальных результатов в диссертации Е.С. Савченко считаю нужным отметить следующие:

- впервые обнаруженный в этой системе ячеистый распад (рис.86, с.116 диссертации);
- микроструктура на рис.87, когда область дисперсного спинодального распада окружена двухслойными оболочками бэ́та и бэ́та-штрих фаз. Эта структурная конфигурация очень напоминает структуру в сплавах системы Sm-Co-Zr-Cu, когда ячейка фазы типа  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  окружена оболочкой фазы типа  $\text{SmCo}_5$ , что и обеспечивает комбинацию высокой коэрцитивной силы и высокой остаточной индукции этого материала. Обнаружение общих закономерностей в столь разных материалах особенно ценно для развития научных основ их технологии;
- исследование термической стабильности сплава альни и обнаружение улучшения термической стабильности при изменении условий распада твердого раствора (изменение схемы термообработки).

Автореферат и публикации соответствуют диссертации и полностью отражают ее содержание.

По работе следует высказать несколько замечаний.

1. Интерпретация зависимости коэрцитивной силы от температуры закалки на рис.62 вызывает сомнения. Нестабильный характер кривой коэрцитивной силы (большие скачки при малых изменениях температуры прерывания охлаждения с критической скоростью (температуры закалки) вряд ли связаны с распадом «хорошей» модулированной структуры (рис.58, критическая скорость охлаждения до 20°C) и образованием дисперсной неупорядоченной



структуры выделений при критическом охлаждении до 870°C (рис.63) или до 850°C (рис. 65). Очевидно, что структуры на рис.63 и 65 образовались сразу такими, а не испортили «хорошую» структуру. Причина, скорее всего в том, что в этой области температур все происходит очень быстро, а температуру участка образца, из которого вырезана фольга для просвечивающей микроскопии, мы знаем не точно. При диаметре образца 12 мм и скорости охлаждения 4-6 град/мин заметное уменьшение температуры произойдет в слое, толщиной лишь 1/17 от диаметра образца.

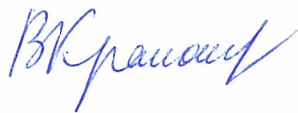
2. Кривые ДСК на рис.51 показывают заметные тепловые эффекты в низкотемпературной области: в районе 500-550°C при нагреве и 180-200°C при охлаждении. В тексте диссертации эти эффекты не обсуждаются. Между тем на рис.74 этому тепловому эффекту точно соответствует максимум намагниченности насыщения сплава (тоже без обсуждения). Эти оба эффекта явно напоминают эффекты структурной релаксации при низкотемпературных выдержках металлических стекол, и говорят о том, что после охлаждения ниже 500°C локальные преобразования структуры далеко не закончились (как и в сталях при низкотемпературном отпуске).

3. Непонятно, почему тонкую внутризеренную структуру на рис.85 диссертантка трактует как следы границ антифазных доменов. Если бы это были антифазные границы, они должны быть параллельны определенным кристаллографическим направлениям, а этого нет. Скорее всего, это границы блоков мозаики, декорированные выделениями упорядоченной В2-фазы (как справедливо пишет диссертантка).

4. Использование графиков Хенкеля (рис.89) в диссертации очень полезно и является положительной стороной работы. Но трактовка особенностей этих графиков как проявление (или не проявление) обменного взаимодействия между разными фазами сомнительна. Обменное взаимодействие – эффект взаимодействия между спинами в первой координационной сфере (обменный интеграл зависит от отношения диаметра незаполненной электронной оболочки атома и межатомного расстояния). Было бы интересно из построенных кривых возврата получить распределение объемов по величине коэрцитивной силы по методике McCurrie (Phil. Mag., 1970, 1971, Science, 1970) и проследить влияние термообработки на это распределение.

Высказанные замечания не могут изменить общую положительную оценку работы Е.С. Савченко, 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 Е.С. Савченко

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   
01.11.2016

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

