

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Мохамеда Абделкариема Карама Абделкариема на тему "Формирование структуры литых Fe-Ga сплавов при контролируемом охлаждении и отжиге", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Исследуемые в данной работе сплавы Fe-Ga являются функциональными материалами с особыми магнитными свойствами. Они обладают большой магнитострикцией насыщения  $(3/2)\lambda_{100}$  в относительно небольших магнитных полях, которая слабо зависит от температуры. Кроме того, по уровню механических свойств сплавы Fe-Ga превосходят другие магнитострикционные материалы. Сочетание таких свойств делает эти сплавы перспективными для применения, в частности, в датчиках, приводах, преобразователях энергии, в электромеханических и сенсорных системах и устройствах и т.п.

Согласно современным представлениям (Khachaturyan, Viehland), повышенная магнитострикция связана с процессами трансформации и упорядочения в сверхструктурах типа  $D0_3$ ,  $D0_{22}$  и др., что приводит к тесной корреляции между кристаллографической и зеренной структурой этих сплавов и их результирующими магнитоупругими свойствами. Известно, что в сплавах Fe-Ga в стабильном и, в особенности, в метастабильном состоянии может формироваться достаточно широкий спектр неупорядоченных и упорядоченных фаз на основе ГЦК, ОЦК и ГПУ решеток ( $A2$ ,  $D0_3$ ,  $B2$ ,  $L1_2$ ,  $D0_{19}$ ), и что максимальные значения магнитострикции насыщения наблюдаются при концентрациях вблизи границ областей  $A2 - D0_3$  и  $D0_3 - L1_2$  фаз ( $\approx 18-20\%$  Ga и  $\approx 27-29\%$  Ga). При этом на величину эффекта повышенной магнитострикции большое влияние оказывает количество структурных вакансий, что связано с термической историей материала. Проблема дополнительно усложняется тем, что довольно медленный процесс фазовых превращений в Fe-Ga сплавах приводит к тому, что конечные фазы и их распределение сильно зависят от термической обработки, что увеличивает неопределенность идентификации равновесных и, в особенности, неравновесных фаз. Учитывая, что в основном эти фазы являются метастабильными и образуются в ходе существенно неравновесных процессов, установление кинетических путей фазовых превращений важно для понимания особенностей формирования микроструктуры и, как следствие, физических свойств сплавов. Интерес к этой области исследований подтверждается большим количеством публикаций в отечественной и зарубежной научной литературе.

Исследования, представленные в диссертационной работе М.А.К.Абделькариема, направлены на установление закономерностей протекания фазовых превращений в двойных сплавах Fe-Ga в интервале концентраций Ga от 15 до 45 %, кинетики распада метастабильных фаз, особенностей фазовых превращений в сплавах на основе системы железо-галлий, дополнительно легированных РЗМ. Важно отметить, что для исследования фазового состава и кинетики фазовых превращений М.А.К.Абделькарием использовал комплекс экспериментальных методов, включая нейтронный структурный анализ. Поскольку магнитострикционные материалы обладают относительно высокой демпфирующей способностью, полезным оказалось и привлечение метода внутреннего трения. Это позволило провести очень подробное и тщательное исследование.

Практическое применение результатов диссертационной работы для совершенствования режимов кристаллизации и последующей термической обработки литых Fe-Ga сплавов с повышенными значениями магнитострикции и достаточно высокими механическими свойствами представляется весьма перспективным. В связи с этим тематика и основное направление диссертационной работы М.А.К.Абделькариема являются, безусловно, актуальными.

К числу основных результатов работы диссертационной работы М.А.К.Абделькариема можно отнести следующее.

1. Получены новые данные о структуре сплавов системы Fe-Ga в неравновесном (ускоренная кристаллизация) и равновесном (длительный отжиг) состояниях. В результате была получена равновесная диаграмма состояния Fe-Ga сплавов с уточненными положениями линий сольвуса. Также получены интересные данные о кинетике формирования равновесных фаз в ходе изотермических выдержек. Для установления температурных границ фазовых переходов результативно использованы температурные зависимости внутреннего трения.

2. Исследованы особенности развития фазовых превращений I и II рода в ходе релаксации метастабильных состояний, получающей развитие при нагреве или в ходе изотермических отжигов неравновесных сплавов. Дополнительно подтверждено, что решающую роль в формировании структуры с максимальной магнитострикцией играют такие факторы как скорость охлаждения и содержание галлия в сплавах.



Впервые построены термокинетические диаграммы и определены критические скорости охлаждения для Fe-Ga сплавов с концентрациями Ga выше 17,5 %. Установлено влияние скорости охлаждения на последовательность процессов фазовых превращений в сплавах железа с повышенной концентрацией галлия.

3. Установлены механизмы и особенности влияния на фазовый состав и магнитострикцию сплавов железо-галлий малых добавок редкоземельных элементов. Легирование элементами Tb, Er, Yb и др. (до 0,5 %) стабилизирует упорядоченную структуру и значительно повышает значения магнитострикции за счет образования на границах зерен сетки включений, образованных содержащей РЗМ фазой. Оптимальным для повышения магнитострикции и стабилизации полученной структуры является содержание легирующих элементов около 0,2 %.

Практическая значимость работы, прежде всего, состоит в уточнении равновесной диаграммы состояния и построении термокинетических диаграмм Fe-Ga сплавов. Эти данные позволяют осознанно выбрать оптимальное содержание основных компонентов и условия термообработки материалов. Полученные данные пополняют базы данных по фазовым равновесиям и могут быть использованы в справочных изданиях.

По тексту автореферата можно сделать замечание.

1. На стр. 12 автореферата (первый абзац) сказано, что в работе были проведены исследования зависимости намагниченности  $M$  сплавов от температуры. Полученные результаты представлены на рис. 3, 4 и др. Однако приведенные на этих рисунках значения намагниченности  $M$  представлены в единицах эме/г, а это является общепринятой размерностью удельной магнитной восприимчивости. Здесь требуется дополнительное пояснение, какую величину измеряли и что показано на рисунках.

В целом, диссертация М.А.К.Абделькариема оставляет хорошее впечатление новизной и важностью полученных результатов. Работа выполнена на современном научном оборудовании, методически правильно построена, исследования характеризует системный подход к решению поставленных задач и поэтому достоверность полученных результатов и выводов не вызывает сомнений. Основное содержание диссертации с достаточной полнотой опубликовано в отечественных и зарубежных научных изданиях и доложено на научных конференциях.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа на тему "Формирование структуры литых Fe-Ga сплавов при контролируемом охлаждении и отжиге" представляет собой законченный научно-квалификационный труд, обладает актуальностью, научной новизной, научной и практической значимостью, удовлетворяет требованиям п. 9 Положения "О порядке присуждения ученых степеней", предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Мохамед Абделкарием Карам Абделкарием заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Доктор физики-математических наук  
(специальность 01.04.07),  
профессор,  
профессор кафедры физики



Левин Даниил Михайлович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования "Тульский государственный университет"  
Адрес: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92.  
Телефон: +7 (4872) 25-79-28  
Email: [danlevin48@gmail.com](mailto:danlevin48@gmail.com)

Подпись Д.М.Левина заверяю

