

УТВЕРЖДАЮ:
Ген. директор АО «КОМПОЗИТ»

Д.т.н. __Береснев А.Г.



«__27__» __апреля__ 2021 г.



О Т З Ы В

ведущего предприятия на диссертационную работу

Мохамеда Абделкариема Карама Абделкариема

“Формирование структуры литых Fe-Ga сплавов при контролируемом охлаждении и отжиге”, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов».

Диссертационная работа Мохамеда Абделкариема Карама Абделкариема посвящена актуальной проблеме - обоснованию принципов управления свойствами Fe-Ga сплавов путем контроля их структуры посредством различных термических воздействий, в том числе изотермическим отжигом и регулируемым охлаждением. Исследование формирования структуры Fe-Ga сплавов при литье и последующих термических воздействиях: непрерывном нагреве и охлаждении с различными скоростями; изотермическом отжиге и закалке – является наиболее актуальным на сегодняшний день направлением исследований в области металловедения, так как дает понимание влияния структуры на функциональные, в том числе магнитные, свойства Fe-Ga сплавов. Особое внимание уделено влиянию легирования Fe-Ga сплавов редкоземельными элементами, такими как Pr, Sm, Tb, Dy, Er, и Yb на фазовые превращения и свойства.

Работа направлена на исследование кинетики фазовых переходов первого рода ($A2/D0_3 \rightarrow L1_2$) и второго рода ($A2 \rightarrow D0_3$) в сплавах системы Fe-Ga в широком диапазоне содержания Ga при нагреве, охлаждении и изотермическом отжиге, а также определение критических скоростей охлаждения, соответствующих началу и концу фазовых превращений из метастабильного в равновесное состояние, то есть построены термокинетические диаграммы перехода из метастабильного в равновесное состояние для сплавов с наиболее перспективным содержанием Ga.

Главным в диссертационной работе является получение фундаментальных закономерностей протекания фазовых превращений в системе Fe-Ga и обоснование механизма фазовых превращений при переходе сплавов из метастабильного в равновесное состояние. Диссертантом разработана карта фазовых превращений для Fe-(15-45)Ga сплавов, позволяющая установить степень распада неравновесных фаз и образования равновесных фаз и, таким образом, связать структурные превращения с функциональными свойствами фаз. На основе построенной карты фазовых превращений предложены режимы термической обработки для формирования сплавов с регулируемой магнитострикцией и сплавов со стабильно высокой намагниченностью при нагреве и охлаждении. Это один из важнейших результатов работы, имеющий как научное, так и практическое значение.

Диссертационная работа Мохамеда Абделкариема Карама Абделкариема состоит из 5 глав. В первой сделан обзор литературы, дается подробный анализ по функциональным сплавам с высокой магнитострикцией на основе железа и обсуждено современное состояние исследований процессов упорядочения в сплавах на основе Fe-Ga. Обзор является полным и хорошо отражает современную ситуацию по состоянию изучаемой проблемы. Литературный обзор по диссертации представляет самостоятельную ценность. Сделанные выводы четко формируют цели и задачи исследования.

Из второй главы, где рассматриваются объекты и методы их исследования, следует, что автор диссертации экспериментально исследовал сплавы системы Fe-Ga в интервале содержания Ga от 15 до 45 ат. %. При этом были использованы современные методики, среди которых дифракция нейтронов, рентгеновская дифракция, сканирующая, просвечивающая и магнито-силовая микроскопия, измерения магнитных свойств, внутреннее трение, калориметрия, дилатометрия и другие. Важно отметить, что эксперименты проводились с использованием современного оборудования. Все это создало основу для получения достоверных и воспроизводимых результатов, обеспечивающих надежность сделанных в работе выводов.

В третьей главе подробно рассмотрена структура в метастабильных Fe-(15-45)Ga сплавах, т.е. в литом состоянии после быстрой кристаллизации и фазовые превращения при нагреве с использованием различных методик, включая "*in situ*" испытания с различными скоростями нагрева. Приведенные результаты безусловно несут большую практическую значимость для производства деталей из Fe-Ga. Результаты, представленные в главе 3, показали, что формирование различных структур при комнатной температуре в литых образцах ($A2 \rightarrow A2 + D0_3 \rightarrow D0_3 + B2 \rightarrow B2 + Fe_{13}Ga_9 \rightarrow \beta\text{-Fe}_6\text{Ga}_5$ с увеличением содержания Ga в системе Fe-Ga), хорошо коррелируют с изменением параметра решетки в зависимости от содержания Ga и это объясняет изменение магнитострикции сплава. После почти линейного увеличения как параметра решетки, так и магнитострикции (до ~19%), ($A2 \rightarrow A2/D0_3$) оба значения уменьшаются до 23% из-за появления упорядоченных кластеров $D0_3$, ($A2/D0_3 \rightarrow D0_3$) параметр решетки увеличивается, и магнитострикция также достигает своего максимального значения, из-за увеличения упорядоченности и увеличения размера кластеров $D0_3$ до 27%, и ($D0_3 \rightarrow D0_3/B2$) уменьшения магнитострикции и изменения скорости увеличения параметра решетки по той причине, что упорядоченные кластеры занимают относительно небольшой объем по сравнению с объемом неупорядоченной матрицы.

В четвертой главе излагаются результаты исследования сплавов по влиянию содержания Ga на сплавы Fe-Ga в их равновесном состоянии после длительного отжига, включая пересмотренную фазовую диаграмму равновесия. Согласно данным дифракции нейтронов изотермический отжиг Fe-18,6Ga и Fe-19,5Ga сплавов при 320-330°C приводит к появлению упорядоченной $D0_3$ фазы в A2 матрице литых сплавов, что соответствует фазовому превращению второго рода. Изучение кинетики перехода первого рода в Fe-27Ga сплаве с помощью EBSD анализа позволило заключить, что зарождение и рост $L1_2$ -фазы происходят на границах зерен $D0_3$ фазы. Полученные результаты рентгеноструктурного и структурного анализа показали, что легирование Fe-Ga сплавов с РЗМ задерживает этот переход (который отрицательно влияет на магнитострикцию Fe-Ga сплавов) на более длительное время, что положительно сказывается на сроке их службы, так как их можно использовать при более высокой температуре в течение более длительного времени без снижения их магнитострикции. В соответствии с фазовой диаграммой, предложенной Кёстером и Гёдеке, идентифицирована структура M-фазы, показаны интервалы ее устойчивости и возможность ее растворения с образованиям $Fe_{13}Ga_9$ структуры при длительном отжиге (до 1800 ч) сплавов с содержанием Ga от 28,9 до 38,4%, в диапазоне температур от 300 до 500°C.

В пятой главе приведены результаты по влиянию скорости охлаждения на структуру и функциональные свойства Fe-Ga сплавов. В этой главе с применением дифракционных методик была проанализирована структура Fe-(15-33)Ga сплавов после различных скоростей охлаждения. Основным результатом экспериментов, проведенных в данной главе, является то, что впервые построены диаграммы температурно-временных превращений в Fe-Ga сплавах с 27, 24,2, 23,1, 19,5, и 17,5% Ga, имеющие как научную, так и практическую ценность. Количественно определены критические скорости охлаждения: начала (V_{cr1}) и завершения (V_{cr2}) перехода из высокотемпературного в равновесное состояние при охлаждении. Для сплава Fe-27Ga скорость составила $V_{cr1} \sim 30$ и $V_{cr2} \sim 8$ К/мин. Для Fe-24,2Ga, Fe-23,1Ga, Fe-19,5Ga и Fe-17,5Ga сплавов определены скорости начала образования L12 фазы, которые равны 10, 4, 2 и менее 0,8 К/мин, соответственно. Построенные термокинетические диаграммы и определенные критические скорости охлаждения имеют ключевое значение для выбора режимов термообработки Fe-Ga сплавов.

По работе можно сделать следующие замечания:

1. Не указано каким образом контролировались скорости охлаждения при различных условиях снижения температуры (в печи, в песке, на воздухе), какая точность таких экспериментов, имелся ли перепад температур между поверхностью и сердцевиной образца?
2. Было бы целесообразно сформулировать какие преимущества дает дифракция нейтронов по сравнению с рентгеновским излучением применительно к объекту исследования...
3. Для литой структуры сплавов характерна неоднородность химического состава, которая оказывает существенное влияние на локальную микроструктуру сплава и свойства в целом. На наш взгляд, автору следовало бы уделить большее внимание этому вопросу. ...

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы, поскольку сформулированные автором основные выводы по работе являются новыми, достоверными и хорошо обоснованными. Результаты диссертационной работы опубликованы в 9 статьях и 5 сборниках трудов конференций. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации. Автореферат и диссертация написаны грамотно и хорошо оформлены.

По объёму и глубине научной и практической ценности, методическому уровню работа Мохамеда Абделкариема Карама Абделкариема полностью соответствует требованиям к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Главный научный сотрудник
д. ф.-м. н., профессор



Разумовский И.М.