

УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИФПМ СО РАН  
член-корр. РАН  
\_\_\_\_\_ С.Г. Псахье  
« \_\_\_\_ » ноября 2017 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу Белослудцевой Елены Сергеевны  
на тему «Микроструктура, термоупругие мартенситные превращения и  
свойства В2 сплавов на основе Ni-Mn»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

#### **Актуальность темы диссертации**

Современный уровень развития науки, техники и экономики требует использования материалов, способных функционировать в различных, подчас самых экстремальных, условиях, например, при температурах, близких к температурам плавления многих металлических материалов. Сплавы с эффектами памяти формы (ЭПФ) способны функционировать в широком диапазоне изменений внешних условий: от высоких (около 1000 К) до низких (около 80 К) температур, приложенных механических напряжений, электрического тока, или в магнитном поле.

В настоящее время высокие темпы развития микроэлектронной техники привели к актуализации задач создания высокотемпературных материалов с ЭПФ простых химических составов, технологичных с точки зрения их производства и передела. К таким материалам относятся бинарные и тройные сплавы на основе никелида марганца. Бинарные сплавы системы Ni – Mn исследованы сравнительно хорошо, тогда как интерес к тройным сплавам на основе этой системы проявился сравнительно недавно, когда было показана возможность управлять функциональными свойствами этих материалов путем легирования их третьим элементом. Однако исследования структурно-фазовые превращений и свойств этих сплавов только разворачиваются и далеки от своего завершения. Поэтому, цель и научные задачи данного диссертационного исследования являются бесспорно актуальными.

## Структура и основное содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Белослудцевой Е.С. состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 150 цитируемых источников, списка сокращений. Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, определены и сформулированы цель и задачи исследований, описаны научная новизна результатов, их теоретическое и практическое значение, методы исследования, достоверность и обоснованность, а также представлены положения, выносимые на защиту. Основное содержание диссертации представлено в 35 научных публикациях, в том числе – 8 статьях в реферируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 1 главе в монографии, 24 тезисов докладов на российских и международных конференциях. Диссертация содержит 167 страниц текста, 111 рисунков и 13 таблиц.

В литературном обзоре (глава 1) диссертант обсуждает современное состояние проблемы термоупругих мартенситных превращений (ТМП); рассматривает основные закономерности влияния легирования на температуры фазовых переходов и структуру мартенситных фаз; анализирует современные представления о механизмах формирования предмартенситных состояний. Сделано заключение о крайней недостаточности количества экспериментальных данных о влиянии легирования на температуру и протекание ТМП, отсутствии диаграмм фазовых превращений трехкомпонентных сплавов, исследуемых в данной работе. Сформулированы цель и научные задачи диссертационной работы.

Во второй главе обоснован выбор материалов – бинарных сплавов эквиатомного ( $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$ ) и обедненного по никелю ( $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{51}$ ) составов, а также 21 композиции из тройных сплавов на основе  $\text{NiMn}$ , легированных вдоль квазибинарных разрезов – титаном, алюминием или галлием. Описаны способы изготовления сплавов, термообработки, методы приготовления образцов для исследования. Изложены (1) *методы измерения* – магнитной восприимчивости, электросопротивления, коэффициентов теплового расширения, микротвердости; (2) *методы исследования* – рентгеновской дифрактометрии, в том числе температурной рентгенографии, просвечивающей электронной микроскопии (в режимах светлого и темного полей, метод микродифракции), сканирующей электронной микроскопии, включающей методы энергодисперсионного анализа и реконструкции структуры с использованием карт дифракции обратнорассеянных электронов.

Оригинальная часть работы и обсуждение ее результатов представлены в 5 главах: в главе 3 изучены фазовые составы и превращения в бинарных сплавах  $\text{Ni}_{50}\text{Mn}_{50}$  и  $\text{Ni}_{49}\text{Mn}_{51}$ . Определены температуры фазовых переходов, фазовый состав. Изучена их микроструктура. В главах 4, 5, 6 детально изучены сплавы тройных составов на основе  $\text{NiMn}$ , в том числе –

описано влияние легирования титаном, алюминием или галлием на ТМП, структуру и свойства сплавов системы Ni-Mn. Приведено большое количество прекрасных электронномикроскопических светлопольных и темнопольных изображений внутренней структуры исследуемых материалов, детальных микрофракционный анализ. Главы завершаются построением фазовых диаграмм мартенситных превращений сплавов  $Ni_{50}Mn_{50-x}Ti_x$  квазибинарной системы NiMn – NiTi (глава 4),  $Ni_{50}Mn_{50-y}Al_y$  квазибинарной системы NiMn – NiAl, сплавов  $Ni_{50}Mn_{50-z}Ga_z$  квазибинарной системы NiMn – NiGa.

В главе 7 на основе кристаллохимического подхода проанализирована возможность применения правил Юм-Розери для предсказания условий формирования твердых растворов в исследуемых сплавах. Сделано заключение, что основным и контролирующим фактором проявления «твердого раствора» в марганцевой подрешетке B2- (и L21-) сверхструктуры, легируемой атомами Ti, Al, Ga, является размерно-геометрический фактор (близость атомных радиусов и наличие плотноупакованных структур ГЦК, ГПУ, ОЦК).

Каждая оригинальная глава завершается выводами, а диссертация завершается заключением, в котором сформулированы основные выводы исследования.

### **Научная новизна результатов диссертационной работы**

В работе получен ряд новых и важных научных результатов. К наиболее существенным результатам относятся следующие:

- Впервые построены полные фазовые диаграммы мартенситных превращений в тройных сплавах квазибинарных разрезов NiMn – NiTi, NiMn-NiAl, NiMn – NiGa.
- Впервые определено, что высокообратимое мартенситное превращение  $B2 \leftrightarrow L1_0$  происходит в сплавах NiMn с уменьшением удельного объема при охлаждении, величина которого при нагреве в процессе обратного превращения полностью восстанавливается.
- Впервые показано, что в предмартенситном состоянии аустенит исследованных сплавов может быть описан ближним порядком атомных смещений по типу будущей мартенситной фазы в основном посредством коррелированных и сдвиговых смещений по системе  $\{101\} \langle 101 \rangle$  ОЦК с образованием нанолокализованных сдвиговых структур.
- Впервые предложен кристаллоструктурный механизм ТМП  $B2 \leftrightarrow L1_0(2M)$  для сплавов Ni-Mn и установлены ориентационные соотношения:  $(011)B2 \parallel (111)3R/2M$ ;  $[0\ 1]B2 \parallel \langle 11 \rangle 3R/2M$ , в отличие от принятых в литературе для таких превращений соотношений Бейна.

- Обнаружено, что при содержании Ti более 15 ат. % тройные квазибинарные сплавы  $Ni_{50}Mn_{50-x}Ti_x$  испытывают распад с выделением длиннопериодных упорядоченных трехкомпонентных фаз на основе Ni–Mn–Ti, обогащенных никелем. Напротив, в сплавах, легированных алюминием и галлием, во всем интервале исследуемых квазибинарных составов распад не был обнаружен.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационной работы**

Фундаментальные результаты, полученные в диссертации, включая концентрационные и температурные зависимости фазовых переходов и структурно-морфологические закономерности термоупругих мартенситных превращений, расширяют представления физики конденсированного состояния о механизмах фазовых превращений мартенситного типа и закладывают основы для теоретического обобщения и практического применения таких материалов. Полученные результаты по исследованию микроструктуры и свойств позволяют практически использовать данные сплавы для разработки функциональных элементов в конструкциях различного назначения.

### **Достоверность и обоснованность результатов исследования**

Достоверность полученных результатов обоснована использованием аттестованных образцов, проведением измерений на сертифицированном оборудовании и исследований на современном структурно-аналитическом оборудовании, воспроизводимостью результатов на большом числе сплавов и их согласием известными в литературе данными, полученными другими методами.

### **Апробация работы**

Результаты работы широко обсуждались на многочисленных научных конференциях, хорошо представлены в достаточном количестве публикаций в ведущих рецензируемых отечественных и зарубежных научных изданиях с высоким импакт-фактором, что свидетельствует об их международном признании. Автореферат работы полно воспроизводит содержание диссертации. Содержание диссертации соответствует указанной специальности.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. В развернутом литературном обзоре главы 1 большое внимание уделено описанию особенностей термоупругих мартенситных превращений и обусловленным ими

свойствам неупругости в сплавах на основе никелида титана (см. стр. 23–35). Можно было бы сократить литературный обзор по этим сплавам, учитывая большое количество научных статей и монографий на эту тему, широко известных специалистам.

2. Хотя в диссертационной работе не была поставлена задача оценки свойств неупругости бинарных и тройных сплавов на основе NiMn – эффектов памяти формы и/или сверхэластичности, однако, на наш взгляд, даже предварительные оценки этих свойств очень важны, учитывая перспективу практического использования данных сплавов. Интересно было бы оценить также влияние типа и концентрации легирующего элемента на свойства неупругости в данных сплавах.

3. Совокупность критериев, определяющих условия растворимости в твердом состоянии и стабилизации фаз с атомно упорядоченными структурами, диссертантом названа правилами Юм-Розери (см. стр.127), хотя, как известно, под правилом Юм-Розери понимается только изменение размерного фактора (соотношения радиусов) и это правило, как и другие (например, правило электроотрицательности) сформулировано для случая двухкомпонентных систем. Диссертанту следовало бы обосновать возможность распространения данного феноменологического подхода для случая трехкомпонентной системы.

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы и ее высокой положительной оценки.

### **Общая оценка диссертационной работы**

В целом диссертационная работа Белослудцевой Е.С. на тему «Микроструктура, термоупругие мартенситные превращения и свойства В2 сплавов на основе Ni-Mn» является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены важные теоретические и экспериментальные результаты. Диссертация имеет все необходимые разделы от постановки задачи, методов их решения до результатов расчетов и экспериментов, их анализа, выводов и заключения. Материалы работы представлены в большом числе публикаций. Автореферат диссертации и публикации полно и правильно отражают содержание работы. Диссертационное исследование Белослудцевой Е.С. соответствует пунктам 1 и 3 паспорта специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

### **Заключение**

Считаем, что диссертационная работа «Микроструктура, термоупругие мартенситные превращения и свойства В2 сплавов на основе Ni-Mn» соответствует всем требованиям

Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор Белослудцева Е.С. заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа, автореферат и отзыв обсуждены и одобрены на заседании Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), протокол № 9 от 27 октября 2017 г.

Главный научный сотрудник лаборатории материаловедения сплавов с памятью формы ИФПМ СО РАН, доктор физ.-мат.наук, профессор Л.Л. Мейснер  
Почтовый адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4  
тел.: (3822) 28-69-89; e-mail: llm@ispms.tsc.ru

Учёный секретарь ИФПМ СО РАН,  
кандидат физ-мат. Наук

Н.Ю. Матолыгина

## Сведения о ведущей организации

по кандидатской диссертации Белослудцевой Елены Сергеевны  
«Микроструктура, термоупругие мартенситные превращения и свойства В2 сплавов на  
основе Ni-Mn», по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Полное наименование организации в соответствии с Уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Сокращенное наименование организации в соответствии с Уставом	ИФПМ СО РАН
Ведомственная принадлежность	ФАНО
Почтовый индекс, адрес организации	634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	<a href="http://www.ispms.ru">www.ispms.ru</a>
Телефон	Тел./факс (3822) 491-881 /49-25-76
Адрес электронной почты	<a href="mailto:root@ispms.tomsk.ru">root@ispms.tomsk.ru</a>
Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет	<p>1. Абрикосов И.А., Никонов А.Ю., Пономарева А.В., Дмитриев А.И., Баранникова С.А. Использование метода точных МТ-орбиталей для моделирования термодинамических и механических свойств чистых компонентов сплавов на основе Ti и Zr // Успехи физики металлов. – 2013. – Т. 14. – №.4. – С. 315-354.</p> <p>2. Астафурова Е.Г., Тукеева М.С., Мельников Е.В., Кретов Ю.Л., Никулина А.А., Великосельская Е.Ю. Влияние легирования алюминием на закономерности измельчения структуры монокристаллов аустенитной стали Гадфильда при кручении под давлением // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. – 2013. – № 1. – С. 58-62.</p> <p>3. Грабовецкая Г.П., Попов В.В., Мишин И.П., Сергеев А.В. Эволюция спектра разориентировок границ зерен субмикроструктурного молибдена при деформации в условиях диффузии никеля по границам зерен // Физика металлов и материаловедения. – 2013. – Т. 114. – № 12. – С. 1128-1135.</p> <p>4. Перевалова О.Б., Коновалова Е.В., Конева Н.А., Козлов Э.В. Влияние атомного упорядочения на зернограницные ансамбли ГЦК-твердых растворов.</p>

- Томск: Изд-во НТЛ, 2014. – 248 с.
5. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Лунев А.Г., Горбатенко В.В., Зуев Л.Б. Закономерности локализации пластического течения при электролитическом насыщении водородом ОЦК-сплава железа // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т. 40. – № 5. – С. 51-58.
6. Дитенберг И.А., Денисов К.И., Тюменцев А.Н., Корчагин М.А., Корзников А.В. Особенности микроструктуры и упрочнения Nb после механической активации и последующей консолидации кручением под давлением // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – № 10. – С. 68-75.
7. Панин В.Е. Физическая мезомеханика материалов / отв. ред. С.Г. Псахье. – Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2015. – Т. 1. – 462 с. ISBN 978-5-94621-504-6.
8. Панин В.Е. Физическая мезомеханика материалов / отв. ред. С.Г. Псахье. – Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2015. – Т. 2. – 464 с. ISBN 978-5-94621-505-3.
9. Лотков А.И., Гришков В.Н., Кашин О.А., Батурин А.А., Тимкин В.Н., Жапова Д.Ю. Формирование СМК структуры при теплой изотермической деформации и ее влияние на мартенситные превращения в сплавах на основе никелида титана // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 6. – С. 10-15
10. Meisner L.L., Ostapenko M.G., Lotkov A.I., Neiman A.A. Surface microstructure and B2 phase structural state induced in NiTi alloy by a highcurrent pulsed electron beam // Applied Surface Science. – 2015. – Vol. 324. – P. 44-52.
11. Корчуганов А.В., Зольников К.П., Чернов В.М., Псахье С.Г. Первичная радиационная повреждаемость упруго-деформированного железа с внутренней структурой // ВАНТ, Серия: Материаловедение и новые материалы. 2016. Т.1(84). С. 26-38.
12. Панин В.Е., Елсукова Т.Ф., Сурикова Н.С., Попкова Ю.Ф., Борисюк Д.В. Роль поворотных мод деформации в процессах разрушения поликристаллов высокочистого алюминия при низкотемпературной ползучести // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 12. – С. 2–9.

Верно

Ученый секретарь Института  
к.ф.-м.н.

Н.Ю. Матольгина

**Сведения о лице, утверждающем отзыв ведущей организации**

Фамилия, имя, отчество	Псахье Сергей Григорьевич
Ученая степень и отрасль науки, научные специальности, по которым им защищена диссертация	Доктор физико-математических наук. 01.04.07 - физика твердого тела. Член-корреспондент РАН.
Наименование организации, являющейся основным местом работы, должность	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук. Директор Института.

Верно

Ученый секретарь Института,  
к.ф.-м.н.

Н.Ю. Матолыгина