

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Гусева Дмитрия Евгеньевича на тему
«Физико-химические принципы управления структурой и свойствами
сплавов на основе никелида титана для обеспечения регламентированных
характеристик работоспособности функциональных конструкций»,
представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по
специальности 05.16.01 — Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов

Хорошо известно, что функциональные, механические и некоторые физические свойства никелида титана чрезвычайно чувствительны к количественному соотношению основных компонентов и к содержанию атомов внедрения, особенно кислорода. Это создает трудности при промышленном производстве заготовок заданного состава. К настоящему времени опубликовано значительное количество монографий и статей, посвященных соответствию состава, структуры и свойств сплавов на основе TiNi. Однако в большинстве публикаций рассматриваются частные вопросы структурообразования, а комплексных аналитических работ сравнительно немного. Следует отметить, что в основном исследования проведены на сплавах, полученных в лабораторных условиях. Но даже при исследовании промышленных материалов, технология их получения и обработки, как правило, либо вообще не раскрывается, либо сведения о технологических параметрах очень ограничены. Очевидно, что все эти факторы препятствуют активному использованию сплавов в технике и медицине.

В связи с этим диссертационная работа Гусева Д.Е., посвященная изучению влияния химического состава и технологий получения и обработки на структуру и свойства сплавов на основе никелида титана, представляется актуальной. Разработки по проблеме велись в рамках выполнения государственного задания №11.7449.2017/БЧ.

Диссертацию, включающую 5 глав, отличает направленность и целостность от постановки задачи до обсуждения и выводов по работе.

Диссертантом проведено масштабное исследование структуры и свойств 36 плавов сплавов близких к эквиаtomному составу, полученных разными способами выплавки:

- методом вакуумно-дугового переплава с нерасходуемым электродом;
- комбинацией гарнисажной плавки и вакуумно-дуговой плавки с расходуемым электродом;
- вакуумной индукционной плавкой.

Показано, что сплавы, полученные по разным технологиям и на разной шихте имеют разное количество кислорода и, соответственно, кислородсодержащей фазы – $Ti_4Ni_2(O)$, что вызывает изменение состава В2-фазы и, следовательно, температур формовосстановления. Изучено влияние двухстадийной горячей деформации на структуру и объемную долю

соединения $Ti_2Ni/Ti_4Ni_2(O)$. С помощью методов количественной металлографии определена объемная доля частиц Ti_2Ni , на основе чего рассчитано содержание никеля в В2-фазе и получено уравнение зависимости температур МП от состава В2-фазы. Особенностью представленной работы является установление связи свойств и формирующейся структуры не с номинальным составом сплава, а с составом В2-фазы.

В работе исследовано влияние разных видов термической обработки на структуру и фазовый состав сплавов. Изучена структура после рекристаллизационного и дорекристаллизационного отжига, закалки, а также после старения – изотермического и двухступенчатого. На основе проведенных исследований определен концентрационный состав В2-фазы, в пределах которого старением можно регулировать температуры МП в широком диапазоне. В зависимости от возможности получения разных видов структур после старения предложено три типа сплавов, отличающихся концентрацией никеля в В2-фазе: нестареющие со структурой В2 (β), сплавы со структурой В2+одномодальные включения Ti_3Ni_4 ; сплавы со структурой В2+ бимодальные включения Ti_3Ni_4 .

В работе рассмотрено термомеханическое поведение исследованных сплавов и факторы, влияющие на формовосстановление. Установлены закономерности влияния температуры испытаний относительно точек МП. Показано влияние структуры и состава В2-фазы на деформационные характеристики ЭПФ сплавов. Определены критические напряжения и деформации в сплавах с разной структурой, на основе чего сформулированы рекомендации по выбору оптимальной структуры и режимов термической обработки, обеспечивающих требуемый комплекс характеристик памяти формы.

Определены силовые характеристики исследованных сплавов: максимальное реактивное напряжение, удельная работа восстановления формы. Отмечена обусловленность этих параметров структурой сплавов и составом В2-фазы. Систематизирован масштаб влияния шести структурных параметров на функциональные свойства сплавов. Отдельно следует отметить исследование усталостных свойств.

Результаты проведенных структурных исследований нашли практическое применение при разработке технологии изготовления и обработки имплантатов для остеосинтеза. Основные технологические аспекты работы обобщены в виде рекомендаций по выбору технологии производства полуфабрикатов нитинола.

К числу наиболее существенных результатов, представляющих **научную ценность**, следует отнести следующие.

1. Установлена определяющая роль объемной доли кислородсодержащего соединения $Ti_4Ni_2(O)$ в формировании структуры и комплекса свойств никелида титана. Количество соединений зависит от технологии плавки и от режима термомеханической обработки.

2. Определены граничные концентрации никеля в В2-фазе закаленных сплавов, разделяющие сплавы на три группы по принципу получения типовых структур в результате последующего старения.
3. Установлена зависимость циклической долговечности сплавов от соотношения критического напряжения скольжения и напряжения мартенситного сдвига. Получена математическая модель, связывающая усталостную долговечность с амплитудой деформации.
4. На основе систематизации большого объема экспериментальных данных разработаны рекомендации по выбору состава и технологии плавки и последующей термомеханической и термической обработки для обеспечения комплекса эксплуатационных свойств изделий из никелида титана.

Крайне важной представляется **практическая значимость** результатов работы, описанию которых посвящена вся пятая глава диссертации. Результаты исследований были использованы при разработке пяти технологических инструкций на изготовление медицинских изделий и 7 методических указаний по проведению входного контроля, приемосдаточных и периодических испытаний исходного материала и готовой продукции. Копии актов внедрения приложены к диссертации.

По работе можно сделать следующие замечания.

1. Работа очень объемная и перегружена первичными экспериментальными данными. Изобилие частных результатов и стремление их объяснить приводит к необходимости повторов (например, с. 120 и 179-180). В результате утеряны возможности некоторых обобщений. Так, автор неоднократно пишет о зависимости характеристик формовосстановления от количества и морфологии интерметаллидных кислородсодержащих или вторичных фаз, однако какие-либо графики или схемы в тексте отсутствуют. Результаты исследований характеристик ВФ при разных температурах можно было бы привязать не к абсолютной температуре испытаний, а гомологической температуре относительно точки МП.
2. Автор предлагает и реализует метод определения доли интерметаллидной фазы по температурам восстановления формы. Однако температуры начала и конца формовосстановления не строго соответствуют точкам МП, поскольку зависят от уровня задающей деформации при испытаниях.
3. Автор справедливо указывает на определяющую роль примеси кислорода в структурообразовании сплавов. Обнаружение признаков протекания перитектической реакции в сплавах, где она не должна реализоваться свидетельствует о необходимости анализа тройной диаграммы Ti-Ni-O, о чем автор не упоминает.
4. В тексте диссертации встречаются частные недочеты, а также ошибки и опечатки. Так, на стр. 82 изменение состава В2 фазы объясняется выделением частиц Ti_3Ni_4 . Но фактически состав В2 одинаков с учетом погрешности. На стр. 93-95 отмечено, что в сплавах с высоким

содержанием никеля фаза В2 стабильна, но на рисунке 2.9 дана схема распада В2 в сплавах с повышенным сод никеля.

Отмеченные недостатки имеют частный характер и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы Д.Е.Гусева.

Диссертационная работа и автореферат изложены принятым в современной научной литературе языком. Основные научные выводы и положения достоверны и аргументированы. Работа представляется цельным и всесторонним исследованием.

Основные результаты работы отражены в 72 публикациях, в том числе в 33 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и Scopus. Результаты апробированы на научных конференциях и совещаниях разного уровня. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Диссертация Гусева Д.Е. «Физико-химические принципы управления структурой и свойствами сплавов на основе никелида титана для обеспечения регламентированных характеристик работоспособности функциональных конструкций» является законченным научным исследованием, содержащим новое решение проблемы получения прецизионных сплавов системы TiNi, изучения связи между химическим составом, фазовым и структурным состоянием и эксплуатационными свойствами и имеет существенное значение для развития научного направления «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Выполненный объем исследований, важность полученных результатов и практическая значимость диссертации «Физико-химические принципы управления структурой и свойствами сплавов на основе никелида титана для обеспечения регламентированных характеристик работоспособности функциональных конструкций» полностью соответствуют всем требованиям Положения ВАК Министерства образования РФ, а ее автор, Гусев Дмитрий Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 — Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov i spлавов.

Официальный оппонент:

Маркова Галина Викторовна

доктор технических наук 05.16.01

профессор, зав. каф. физики металлов и материаловедения.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский Государственный университет»

Адрес: 300012, г. Тула, пр. Ленина

Телефон: +7920-276-41-46

e-mail: galv.mark@rambler.ru

