

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы

Применение материалов с эффектом запоминания формы может обеспечить технологический прогресс в таких отраслях промышленности, как авиастроение, судостроение, приборостроение, в автомобильной и медицинской промышленности и др.

Главной причиной, сдерживающей широкое применение сплавов на основе никелида титана, является сложность обеспечения заданных характеристик работоспособности изделий при их серийном производстве.

Практический опыт производства изделий из никелида титана показывает, что на сегодняшний день многие причины, приводящие к нежелательному изменению термомеханических характеристик заготовок изделий в процессе их обработки, до конца не изучены.

Обеспечение требуемого уровня характеристик работоспособности изделия определяет необходимость целенаправленного выбора состава и качества шихты, технологии выплавки слитка и его переработки в полуфабрикат, методов придания формы изделия и его обработки.

Исследование закономерностей влияния фазового состава и структуры на механизмы формоизменения и функциональные свойства ЭЗФ сплавов на основе никелида титана с целью разработки научно-обоснованных принципов и методов управления характеристиками работоспособности готовых изделий, в первую очередь медицинских имплантатов, является актуальной научной проблемой современного материаловедения

Актуальность выполненных исследований подтверждена также тем, что они проведены в рамках реализации проекта по теме «Влияние химического состава и структуры на механизмы формоизменения сплавов на основе никелида титана при деформации и термическом воздействии» (государственное задание № 11.7449.2017/БЧ от 13 марта 2017г.).

Цель работы

Цель работы состоит в установлении закономерностей влияния химического состава и технологий обработки на фазовый состав, структуру, механизмы формоизменения, термомеханические и усталостные свойства

сплавов на основе никелида титана и разработка на этой основе технологических методов обеспечения заданных характеристик работоспособности изделий с ЭЗФ.

В этой связи в диссертационной работе Гусева Дмитрия Евгеньевича разработан научно-обоснованный алгоритм проектирования технологической схемы получения сплавов на основе никелида титана и переработки их в полуфабрикаты и изделия в зависимости от назначения функциональных конструкций, условий их эксплуатации и требований к комплексу свойств.

Определены требования к химическому составу, структуре и термомеханическим свойствам двойных промышленных сплавов на основе никелида титана для производства медицинских имплантатов в зависимости от их назначения.

Разработана методика определения критических деформаций и напряжений сплавов с ЭЗФ, при достижении которых в материале интенсивно развиваются процессы скольжения, а мартенситный механизм формоизменения материала сменяется смешанным механизмом (мартенситное превращение + скольжение).

Предложены классификация и методика определения характеристик работоспособности имплантатов из сплавов на основе никелида титана для остеосинтеза и протезирования связочно-хрящевых структур. Даны практические рекомендации по проведению технических и приемо-сдаточных испытаний имплантатов из сплавов на основе никелида титана для остеосинтеза и протезирования связочно-хрящевых структур.

Предложена методика прогнозирования надежности медицинских изделий по их деформационной долговечности, включающая анализ результатов клинических исследований по функциональным рентгеновским снимкам, математическое моделирование деформаций в изделии при функциональной подвижности и расчет деформационной циклической долговечности по модифицированному уравнению Коффина-Мэнсона. Разработана методика экспериментального определения деформационной циклической долговечности основных типов имплантируемых изделий из сплавов на основе никелида титана.

Научная новизна положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Считаю, что автор четко выделила основные научные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Показано, что соотношение титана и никеля в В2-фазе двойных промышленных сплавов на основе никелида титана в закаленном состоянии, а, соответственно, и минимальный уровень температур восстановления формы при реализации ЭЗФ зависят не только от химического состава сплава, но и от объемной доли соединений типа $Ti_2Ni / Ti_4Ni_2(O, N)$, определяемой содержанием примесей в слитке, методом его выплавки и режимами термомеханической обработки при получении полуфабрикатов и изделий. Предложен метод оценки содержания никеля в В2-фазе закаленных промышленных двойных сплавов на основе никелида титана, учитывающий присутствие богатых титаном фаз типа $Ti_2Ni / Ti_4Ni_2(O, N)$. Получены уравнения регрессии с коэффициентом аппроксимации выше 0,95, связывающие температуры восстановления формы с содержанием никеля в В2-фазе в закаленном состоянии, зависящем от химического состава сплава и объемной доли соединений типа $Ti_2Ni / Ti_4Ni_2(O, N)$.

2. Введены понятия о первой ($x_{кр1}$) и второй ($x_{кр2}$) критических концентрациях никеля в В2-фазе, определяющих возможность и эффективность управления структурой и свойствами сплавов термической обработкой. Показано, что в сплавах с содержанием никеля в В2-фазе менее $x_{кр1}$ (56,8 масс.% / 51,7 ат.% Ni) выделения богатых никелем интерметаллидов при последующей термообработке и, соответственно, изменения температур восстановления формы не происходит. В сплавах с более высоким содержанием никеля в В2-фазе возможно образование богатых никелем интерметаллидов, причем при его концентрации свыше $x_{кр2}$ (58,0 масс. % / 52,9 ат.% Ni) эти интерметаллиды могут иметь бимодальную структуру, образующуюся в результате ступенчатого старения в интервале температур 450–550 °С.

3. Введено понятие критического напряжения $\sigma_{кр}^{0,2}$ ($\tau_{кр}^{0,3}$), которое является характеристикой перехода от мартенситного механизма формоизменения к механизму скольжения дислокаций и определяет накопление необратимой деформации в материале с ЭЗФ. Критическое напряжение $\sigma_{кр}^{0,2}$ ($\tau_{кр}^{0,3}$) в совокупности с соответствующей критической деформацией $\varepsilon_{кр}^{0,2}$ ($\gamma_{кр}^{0,3}$) позволяет установить предельные деформационные и силовые характеристики материалов с ЭЗФ, реализующиеся в определенном сплаве в конкретном структурном состоянии. Установлены закономерности влияния схемы и температуры испытаний, состава и структуры сплавов на основе никелида титана на критические напряжения и деформации материала.

4. Установлено влияние зернограницного, твердорастворного, деформационного и дисперсионного механизмов упрочнения сплава на критические напряжения $\sigma_{кр}^{0,2}$ ($\tau_{кр}^{0,3}$) и деформации $\varepsilon_{кр}^{0,2}$ ($\gamma_{кр}^{0,3}$) материала при

реализации ЭЗФ. Максимальное повышение величины $\tau_{кр}^{0,3}$ (на 140–160 МПа) дает деформационное упрочнение. При совместном действии нескольких механизмов наблюдаемый эффект упрочнения меньше, чем простая сумма упрочняющих эффектов отдельных механизмов.

5. Показано, что величина критической деформации $\epsilon_{кр}^{0,2}$ ($\gamma_{кр}^{0,3}$) увеличивается с разностью критического $\sigma_{кр}^{0,2}$ ($\tau_{кр}^{0,3}$) и фазового σ_m (τ_m) напряжений и снижается с увеличением коэффициента сопротивления деформации при развитии мартенситного превращения (D). При упрочнении материала по одному из механизмов (твердорастворному, дисперсионному, деформационному и зернограничному) наблюдается повышение как $\sigma_{кр}^{0,2}$ ($\tau_{кр}^{0,3}$) так и D .

6. Установлено, что уровень реактивных напряжений (σ_r), развиваемых материалом в условиях противодействия восстановлению формы при нагреве до заданной температуры $T > A_K$, связан с диаграммой деформации материала в сверхупругом состоянии, построенной при той же температуре испытаний T , и зависит от метода определения этой величины.

7. Установлено, что циклическая долговечность конструкций из сплавов на основе никелида титана зависит от преобладающих механизмов формоизменения материала, реализуемых при заданной амплитуде деформаций и зависящих от соотношения напряжений мартенситного превращения и критических напряжений, вызывающих скольжение. Предложена степенная функция, определяющая зависимость долговечности от амплитуды деформации при жестком циклическом нагружении; определены физическое содержание и численные значения ее параметров, и их зависимость от структуры и механизмов формоизменения.

8. Предложены научно-обоснованные принципы выбора состава и метода выплавки слитков из сплавов на основе никелида титана, технологии их переработки в полуфабрикаты и изделия для обеспечения требуемого уровня характеристик работоспособности и надежности различных типов конструкций, реализующих ЭЗФ и СУ.

Практическая значимость полученных автором результатов

1. Определены требования к химическому составу, структуре и термомеханическим свойствам двойных промышленных сплавов на основе никелида титана для производства медицинских имплантатов в зависимости от их назначения. Разработаны и внедрены в АО «КИМПФ» технологии придания заданной формы и управления характеристиками работоспособности методами термической обработки при серийном производстве имплантируемых медицинских изделий из сплавов на основе

никелида титана в зависимости от назначения и условий эксплуатации изделий.

2. Разработана методика определения критических деформаций и напряжений сплавов с ЭЗФ, при достижении которых в материале интенсивно развиваются процессы скольжения, а мартенситный механизм формоизменения материала сменяется смешанным механизмом (мартенситное превращение + скольжение). Методика основана на повторяемых последовательных нагружении, разгрузении и нагреве образцов выше температуры A_K с постепенно увеличивающейся максимальной деформацией до появления значимой величины невосстановленной деформации (0,2 % при растяжении, сжатии и изгибе и 0,3 % при кручении).

3. Разработаны классификация и методика определения характеристик работоспособности имплантатов из сплавов на основе никелида титана для остеосинтеза и протезирования связочно-хрящевых структур. Даны практические рекомендации по проведению технических и приемосдаточных испытаний имплантатов из сплавов на основе никелида титана для остеосинтеза и протезирования связочно-хрящевых структур, внедренные в виде нормативных технологических документов в производство АО «КИМПФ». Полученные в работе результаты были использованы при разработке новых конструкций и создании методик технических испытаний имплантатов, прошедших процедуры государственной регистрации.

4. Предложена методика прогнозирования надежности медицинских изделий по их деформационной долговечности, включающая анализ результатов клинических исследований по функциональным рентгеновским снимкам, математическое моделирование деформаций в изделии при функциональной подвижности и расчет деформационной циклической долговечности по модифицированному уравнению Коффина-Мэнсона. Разработана методика экспериментального определения деформационной циклической долговечности основных типов имплантируемых изделий из сплавов на основе никелида титана.

Достоверность полученных результатов определяется:

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждена результатами большого объема выполненных экспериментов и исследований, проведенных с использованием современных аналитических методов и аттестованного оборудования.

По тексту диссертационной работы и автореферата имеются следующие замечания:

1. В работе исследована структура и свойства слитков сплавов на основе никелида титана, полученных разными методами плавки. В том числе были исследованы слитки, полученные методом индукционной плавки, массой 20 – 30 кг, и комбинированным методом (гарнисажная плавка + вакуумно-дуговой переплав), массой до 800 кг. При этом автор неоднократно указывает на проблему обеспечения в таких слитках однородности химического состава, структуры и функциональных свойств. В тоже время в таблицах 1.9 и 1.10 диссертации приводится содержание никеля, объемная доля фазы Ti_2Ni и температуры восстановления формы, измеренные на образцах, вырезанных из слитков, полученных указанными выше методами. Из этих данных не ясно, относятся ли они ко всему слитку или же характеризуют свойства в какой-либо его отдельной части, отличающейся по своим свойствам от соответствующих усредненных значений для всего объема слитка.

2. Наиболее распространенной в работе длительностью нагрева при исследовании влияния термической обработки полуфабрикатов сплавов на основе никелида титана на их структуру и свойства был выбран 1 час. При этом из текста работы не всегда понятно, чем вызвано такое предпочтение.

3. При обсуждении влияния термической обработки на деформационно-силовые характеристики сплавов на основе никелида титана автор утверждает, что наблюдаемые изменения свойств материала можно связать с преобразованием деформированной структуры полуфабрикатов в рекристаллизованную в результате отжига при температурах выше 570–600 °С, а также с эффектами твердорастворного и дисперсионного упрочнения, обусловленного изменением объемной доли интерметаллидов, богатых никелем. Однако в работе автор не учел, что на изменение деформационно-силовых свойств материала может оказывать влияние еще и текстура деформированных полуфабрикатов, а также ее изменение при рекристаллизационном отжиге.

4. В работе основное внимание уделяется механическому поведению сплавов на основе никелида титана при статических и циклических нагрузках в изотермических условиях. В тоже время многие функциональные конструкции, в частности актуаторы, работают в атермических условиях. Поэтому не ясно, как можно использовать результаты работы по выбору химического состава сплава и технологии их обработки для устройств, изменяющих форму при термоциклировании.

5. Усталостные свойства изделий, в том числе сплавов на основе никелида титана, во многом зависят от состояния их поверхности. Это

состояние будет определяться как финишной обработкой изделий, так и может изменяться применением специальных технологий (ионной имплантацией, высокоэнергетической обработкой и т.п.). Однако, в работе рассмотрен только фактор объемной структуры материала, что ограничивает применимость разработанных рекомендаций.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, а ее автора – как специалиста высокой квалификации. Замечания носят рекомендательный характер для планирования и организации последующих научно-исследовательских работ в рамках данной тематики.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов» в следующих разделах:

п.2. Теоретические и экспериментальные исследования фазовых и структурных превращений в металлах и сплавах, происходящих при различных внешних воздействиях.

п.4. Теоретические и экспериментальные исследования термических, термоупругих, термопластических, термохимических, термомагнитных, радиационных, акустических и других воздействий изменения структурного состояния и свойств металлов и сплавов.

п.8. Исследование работоспособности металлов и сплавов в различных условиях, выбор и рекомендация наиболее экономичных и надежных металлических материалов для конкретных технических назначений с целью сокращения металлоемкости, увеличения ресурса работы, повышения уровня заданных физических и химических характеристик деталей машин, механизмов, приборов и конструкций.

п.9. Разработка новых принципов создания сплавов, обладающих заданным комплексом свойств, в том числе для работы в экстремальных условиях.

п.11. Определение механизмов влияния различных механических, тепловых, магнитных и других внешних воздействий на структурное состояние металлических материалов и разработка на этой основе новых принципов и методик их испытаний, обеспечивающих надежное прогнозирование работоспособности конструкций.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на научно-технических конференциях, опубликованы в статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК.

Заключение:

В целом диссертационная работа Гусева Д.Е. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований получены новые, научно обоснованные технические и технологические решения, проблемы обеспечения заданных характеристик работоспособности изделий с ЭЗФ.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению диссертационная работа на тему «Физико-химические принципы управления структурой и свойствами сплавов на основе никелида титана для обеспечения регламентированных характеристик работоспособности функциональных конструкций», соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842. Автор диссертации Гусев Дмитрий Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.01 – «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов».

Официальный оппонент



01.10.2019

Овчинников Виктор Васильевич

доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации, начальник лаборатории сварочных процессов АО «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ», профессор кафедры "Материаловедение" ФГБОУ ВО "Московский политехнический университет"

Подпись Овчинникова В.В. удостоверяю.

Начальник отдела кадрового администрирования



Новикова Ирина Николаевна

Акционерное общество «Российская самолетостроительная корпорация «МиГ»; Почтовый адрес: 125284, Москва, 1-й Боткинский проезд, д.7; Телефон: +7 (495) 721-81-00; Адрес электронной почты: mig@migavia.ru