

## О Т З Ы В

официального оппонента

о диссертации Бурнаева Александра Владимировича «Влияние химического состава и структуры никелида титана на характеристики работоспособности термомеханических актуаторов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение (машиностроение)»

### **Актуальность темы исследований**

Сплавы с памятью формы (СПФ) на основе никелида титана (TiNi) являются перспективными металлическими материалами не только для медицинского, но и для общетехнического применения. Этим определяется неослабевающий интерес, проявляемый исследователями, технологами и конструкторами к СПФ Ti-Ni в качестве материала рабочего тела т.н. «активаторов» - устройств прямого действия, совершающих механическую работу и позволяющих реализовать новые эксплуатационные возможности или технологии, недоступные при использовании обычных материалов. Задача получения активаторов, обладающих заранее заданными и стабильными эксплуатационными свойствами, весьма сложна вследствие «капризности» СПФ, обусловленной как сложностями технологического плана, так и повышенной чувствительностью их функционального поведения к химическому составу (концентрации никеля и примесных элементов) и структуре, а через это – и к термомеханической предыстории. Ключевым фактором является и завершающая термообработка, которая призвана не только зафиксировать рабочую («вспоминаемую») форму, но и сохранить или придать требуемый комплекс функциональных свойств. Обычно при разработке нового продукта из СПФ и даже при переходе к новой плавке того же номинального состава приходится каждый раз проводить целое исследование. В этой связи исследовательская работа, нацеленная на выявление общих зависимостей в цепочке «состав – структура - свойства», которые можно было бы использовать для управления термомеханическим поведением активаторов, безусловно, актуальна. Именно к таким работам относится диссертация А.В. Бурнаева. Следует отметить, что стоящую перед ним задачу диссертант решил в целом вполне успешно. Им выполнен комплекс исследований, позволивший непротиворечиво объяснить особенности термомеханического поведения материала активаторов в связи как со структурными изменениями, так и с условиями термомеханического воздействия, и сформулировать ясные положения для разработки активаторов с заданными свойствами.

### **Оценка содержания работы, научных положений, выводов**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованных литературных источников и приложения.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации представлен критический обзор литературы по теме диссертации. В нем рассмотрены физико-механические и структурные особенности проявления эффекта памяти формы, его характеристики и основные этапы производства полуфабрикатов и изделий из сплавов на основе никелида титана, влияющие на структуру и свойства материала. Рассмотрены основные области применения сплавов с памятью формы и показана перспективность использования этих материалов для изготовления термомеханических активаторов. Показано, что, несмотря на разработку основных принципов проектирования активаторов и накопленный опыт их эксплуатации, технологические методы повышения характеристик работоспособности активаторов и обеспечения их стабильности при серийном производстве изучены недостаточно и их научная база нуждается в дополнении и систематизации.

В результате проведенного критического анализа литературы были сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** диссертации содержит описание материалов и используемых в работе методов исследований и испытаний. В качестве объектов исследования обоснованно выбраны материалы – представители двух основных типов СПФ системы Ti-Ni, находящихся наибольшее применение в современной технике. Это околоэквиатомный нестареющий и заэквиатомный по никелю стареющий сплавы. Здесь же подробно описаны термомеханическая обработка сплавов и методики приготовления образцов для исследований и испытаний, в том числе для экспериментального моделирования термомеханического поведения активаторов.

Структурные исследования проведены методами световой и просвечивающей электронной микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа. Характеристические температуры мартенситных превращений, служащие важными функциональными характеристиками СПФ, определены методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Для определения характеристик эффекта памяти формы была разработана специальная установка, базирующаяся на наведении предварительной деформации по схеме кручения. Подробно описаны методики испытаний образцов разных сплавов при использовании разных схем восстановления формы – свободного и в условиях механического противодействия. Описана разработанная установка для термомеханических испытаний пружин, моделирующих условия работы активаторов, и методика ее применения.

Содержание второй главы показывает, что диссертационная работа А.В. Бурнаева базируется на надежном методическом основании.

**Третья глава** посвящена исследованию влияния химического состава и структуры СПФ Ti-Ni на закономерности их механического поведения в условиях изотермической деформации при разных температурах. Здесь привлекает внимание проведенный автором теоретический анализ условий реализации эффектов памяти формы и сверхупругости, выявивший ключевую роль сочетания критического напряжения и критической деформации, определяющих границу зон полностью обратимой и частично или полностью необратимой деформаций. Этому способствовал учет деформационного упрочнения на этапе образования мартенсита напряжений или деформационной переориентации мартенсита, которое обычно при упрощенном подходе не принимается во внимание. В этом же разделе описаны результаты изотермических механических испытаний, подтверждающие правильность предложенного теоретического подхода при варьировании химического состава сплавов, механизма и уровня их деформационного упрочнения, положения температуры деформации относительно температурного интервала прямого мартенситного превращения. Прослежены закономерности изменения сочетания критического напряжения и критической деформации при изменении этих условий.

Здесь же представлены структуры сплавов, образующиеся в результате термомеханической обработки по выбранным режимам. При этом в каждом сплаве были целенаправленно сформированы характерные для него структуры: если в нестареющем сплаве 1 это были полигонизованная субструктура и рекристаллизованная структура, то в стареющем сплаве 2 – рекристаллизованная структура, упрочненная выделениями избыточных фаз разного размера. Это позволило автору использовать разные механизмы упрочнения: деформационного, дисперсионного, субзеренного, зернограничного.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования формоизменения сплавов разного состава при термоциклировании в условиях внешнего механического противодействия, моделирующих реальные условия работы активаторов. Здесь изучены закономерности формоизменения элементов из СПФ при чередовании циклов охлаждения и нагрева в зависимости от особенностей термоциклирования (температурного интервала), нагружения (схемы нагружения, уровня напряжений), химического состава,

структуры материала и предварительной деформации. Анализ полученных результатов позволил выявить различие в термомеханическом поведении образцов при изотермических испытаниях и термоциклировании в условиях противодействия восстановлению формы. Оно заключается в том, что переход от мартенситного к дислокационному механизму формоизменения при термоциклировании с противодействием происходит при значительно более низких напряжениях, чем в условиях изотермического нагружения и свободного восстановления формы, как для исходно неупрочненных, так и для деформационно-упрочненных образцов. На основании сравнения формоизменения образцов с разным соотношением легирующих компонентов и структурой также определен ряд важных закономерностей. К ним относятся: одновременное уменьшение накапливаемой за счёт пластичности превращения деформации и остаточной (необратимой при нагреве) деформации при повышении содержания никеля в сплаве свыше его предельной растворимости в В2-фазе; повышение критических напряжений при термоциклировании с увеличением содержания никеля в сплаве и его дисперсионного упрочнения в результате старения; линейное повышение температур восстановления формы в условиях противодействия с увеличением противодействующего напряжения.

**В пятой главе** представлены и проанализированы на основе подхода, учитывающего сочетание критических напряжений и критических деформаций, результаты исследований и испытаний на работоспособность пружинных элементов активаторов из СПФ разного состава и с различными структурами. На основе полученного экспериментального материала разработаны рекомендации для выбора состава и технологии обработки полуфабрикатов и элементов активаторов, работающих в различных термомеханических условиях эксплуатации. Так, для активаторов, работающих при температурах выше 50°C, следует использовать эквиатомный или доэквиатомный составы СПФ Ti-Ni, высокие силовые характеристики которых обеспечивает отжиг при 400-450°C, а деформационные – при 500-600°C. В то же время для активаторов, работающих при температурах ниже 50°C, рекомендован заэквиатомные по никелю составы СПФ Ti-Ni, высокие силовые характеристики которых обеспечивает старение при 450-480°C, а силовые и деформационные – при 480-530°C.

Немаловажно, что разработанные автором рекомендации прошли успешную апробацию в производственных условиях на АО КИМПФ.

### **Оценка новизны и достоверности**

Научная новизна и достаточная обоснованность выносимых на защиту положений и выводов работы не вызывает сомнений. Достоверность результатов обеспечена применением комплекса современных методов исследований, большим объемом экспериментального материала, соответствием экспериментальных результатов теоретическим предпосылкам, отсутствием принципиальных противоречий известным результатам и проведением количественных оценок результатов измерений.

Ценность полученных результатов для науки и практики состоит в том, что в работе:

- показано, что работоспособность термомеханических активаторов из СПФ Ti-Ni определяется сочетанием критических напряжений и критических деформаций и максимальна в области их максимальных значений, но не превышающих последние;

- установлены закономерности изменения критических напряжений и деформаций под влиянием различных факторов, заключающиеся в увеличении критических напряжений под воздействием деформационного или дисперсионного упрочнения, а также увеличения содержания никеля, и уменьшении критических деформаций с повышением температуры испытаний относительно температур обратного мартенситного превращения и увеличением противодействующих напряжений.

- установлены закономерности влияния структурного состояния на термомеханическое поведение СПФ Ti-Ni, которые обогащают существующие представления о механизмах управления функциональными свойствами этих материалов.

В целом результаты работы представляют собой значительный вклад в развитие практического металловедения сплавов с памятью формы и могут быть использованы в качестве научной базы для разработки и создания термомеханических активаторов.

**Практическая значимость диссертационной работы** заключается в получении комплекса экспериментальных результатов исследований структуры и свойств сплавов системы Ti-Ni, которые могут быть использованы для разработки и создания термомеханических активаторов различного назначения.

#### **Замечания по работе:**

1. Формула 2.1 на стр. 57 верна в том случае если  $I_i$  обозначает относительную интенсивность  $i$ -ой рентгеновской линии (а не  $i$ -ой фазы как в тексте) одной из фаз, а  $J_i$  обозначает не «интегральную интенсивность дифракционного максимума  $i$ -ой фазы» (как в диссертации), а абсолютную интенсивность  $i$ -ой рентгеновской линии этой фазы. Из описания в тексте не видно какие рентгеновские линии каких фаз использовали, неясно, учитывали ли в расчетах факторы интенсивности линий и кристаллографическую текстуру.

2. Утверждение о полигонизации аустенита при  $450^\circ\text{C}$  (стр. 76) правдоподобно, но оно обосновано только уменьшением ширины рентгеновских линий, которое обычно наблюдается при последедеформационном нагреве и до начала полигонизации, и в ходе рекристаллизации. Поэтому, раз в работе полигонизованная субструктура не проиллюстрирована результатами прямого наблюдения в электронном микроскопе, то следовало бы дать ссылку на предыдущие работы, где ее наблюдали при  $450^\circ\text{C}$ . Таких работ много.

3. Результаты рентгеноструктурного анализа в тексте обсуждаются, но никак не проиллюстрированы. То же касается и результатов ДСК.

4. Непонятно, на чем основан вывод о выделении при  $520^\circ\text{C}$  (выдержка 1 ч) фазы  $\text{Ti}_2\text{Ni}_3$ , а не  $\text{Ti}_3\text{Ni}_4$ . На соответствующей электронограмме (стр. 78, рис. 3.5 г) видна россыпь рефлексов матрицы и выделений при отсутствии сколь-нибудь определенной оси зоны матрицы или выделения. Кроме того, по известным данным о кинетике выделения фаз при старении (Нишида, 1986) даже в случае сплава Ti-52 ат.%Ni выделение фазы  $\text{Ti}_2\text{Ni}_3$  начинается при  $520^\circ\text{C}$  после выдержки более 100 часов.

5. На электронограмме рис. 3.5 б отчетливо видны рефлексы R-фазы (а не фазы  $\text{Ti}_3\text{Ni}_4$ ) в характерных для нее промежуточных положениях типа «1/3» и «2/3» между рефлексами B2-матрицы при ее ориентации  $\langle 111 \rangle_{\text{B2}}$ . Присутствие этой фазы и ее возможное влияние не обсуждаются.

6. Сплав, содержащий 54.5 масс.%Ni, рассматривается как стехиометрический, хотя соответствующая атомная концентрация составляет 49.43 %Ni. В то же время сплав, содержащий 55.6 масс.%Ni, рассматривается как застехиометрический по никелю, хотя соответствующая атомная концентрация составляет 50.54 %Ni, т.е. отклонение его от стехиометрии меньше, чем у первого.

Сделанные замечания не касаются существа работы, не влияют на ее основные результаты и выводы и не снижают общую высокую оценку работы.

#### **Заключение**

Диссертационная работа А.В. Бурнаева представляет собой законченную квалификационную работу, выполненную автором самостоятельно на высоком научном

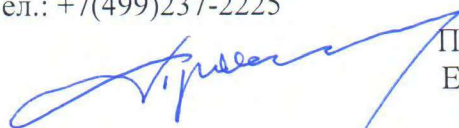
уровне. В работе представлены научные результаты, позволяющие их квалифицировать как новые. Полученные автором работы результаты изложены профессионально грамотно и логично, достоверны, цели и выводы надежно обоснованы. Работа написана понятно и профессионально грамотно, подобающим образом оформлена. Автореферат диссертации содержит все необходимые квалификационные разделы и полностью отражает содержание диссертационной работы. Опубликованные статьи отражают результаты вполне и на должном уровне.

Считаю, что диссертационная работа А.В. Бурнаева «Влияние химического состава и структуры никелида титана на характеристики работоспособности термомеханических актуаторов» соответствует паспорту специальности 05.16.09 – «Материаловедение (машиностроение)» и удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ X 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Бурнаев Александр Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – «Материаловедение (машиностроение)»

Я, нижеподписавшийся, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертационной работы В.Е. Кормышева, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук (специальность 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»), профессор, главный научный сотрудник кафедры «Обработка металлов давлением» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 119049, г. Москва, Ленинский просп., д. 4  
E-mail: [kancela@misis.ru](mailto:kancela@misis.ru), Тел.: +7(499)237-2225



Прокошкин Сергей Дмитриевич  
E-mail: [prokoshkin@tmo.misis.ru](mailto:prokoshkin@tmo.misis.ru)  
Тел.: +7(499)230-2863

21.11.2018г.

ПОДПИСЬ

Проректор по безопасности  
и общим вопросам  
НИТУ «МИСиС»

ЗАВЕРЯЮ

