



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ)

ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002,  
факс: +7 (343) 375-97-78; тел.: +7 (343) 374-38-84  
контакт-центр: +7 (343) 375-44-44, 8-800-100-50-44 (звонок бесплатный)  
e-mail: rector@urfu.ru, www.urfu.ru  
ОКПО 02069208, ОГРН 1026604939855, ИНН/КПП 6660003190/6660003001

17 НОЯ 2018

№ 05-19/1 - 123

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу на диссертационную работу Бурнаева Александра Владимировича «Влияние химического состава и структуры никелида титана на характеристики работоспособности термомеханических актуаторов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Одним из наиболее перспективных направлений современного материаловедения является разработка и освоение в производстве и применении «умных» материалов, обладающих особыми свойствами. К таким материалам с полным основанием можно отнести сплавы с эффектом памяти формы и, в первую очередь, сплавы на основе никелида титана. Они позволяют разрабатывать функциональные конструкции, такие как термомеханические соединения, трансформирующиеся устройства и т.п. Одним из наиболее интересных направлений применения сплавов с эффектом памяти формы являются термомеханические актуаторы, которые по удельной мощности, минимальности габаритов значительно превосходят актуаторы, использующие электромеханический привод, пьезоэлементы и др. Проектирование и производство термомеханических актуаторов требует установления связи между свойствами эффекта памяти формы материала и характеристиками работоспособности изделия. Несмотря на многочисленные исследования, такая связь до конца не выявлена. Это связано с высокой чувствительностью термомеханических свойств никелида титана к его точному химическому составу, включая

наличие неизбежных примесей, и структуре, формирующейся на стадии обработки полуфабриката и получения готового изделия.

Поэтому тема диссертационной работы Бурнаева А. В., направленной на установление таких закономерностей и разработку на этой основе рекомендаций по выбору химического состава и технологии обработки элементов термомеханических актуаторов из сплавов на основе никелида титана является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

### **Общая характеристика работы**

Цель и задачи исследования сформулированы достаточно четко. Автор на основе теоретического анализа механизмов формоизменения сплавов на основе никелида титана определяет критические напряжения и деформации в качестве наиболее важных показателей термомеханического поведения материала и указывает химический состав и структуру как основные факторы, влияющие на их величину.

Фактор химического состава сплава в работе изучен на плавках никелида титана стехиометрического состава и дополнительно легированных никелем. Кроме того, рассмотрены варианты с малым и повышенным содержанием примесей. Структурой исследованных образцов управляли отжигом деформированных полуфабрикатов и их старением, позволяющими получить в материале широкий спектр структур и размеров структурных составляющих.

Для образцов с разным химическим составом и структурой определено механическое поведение в изотермических условиях и при термоциклировании в интервале температур прямого и обратного мартенситного превращения под нагрузкой. На основании проведенных исследований установлены закономерности изменения критических деформаций и напряжений от химического состава сплава и его структуры в разных условиях испытания.

Анализ возможных схем термомеханических актуаторов позволил автору определить связь их характеристик работоспособности со свойствами эффекта памяти формы сплавов на основе никелида титана и, в частности, с величинами критических деформаций и напряжений.

Испытания различных типов актуаторов с пружинными элементами из никелида титана подтвердили сделанные выводы и позволили разработать рекомендации по выбору химического состава и технологии термической обработки элементов термомеханических актуаторов из никелида титана различного назначения.

### **Наиболее важные полученные результаты.**

Научная новизна диссертационной работы Бурнаева А.В. не вызывает сомнения и заключается в следующем:

- показано, что работоспособность термомеханических актуаторов из сплавов на основе никелида титана определяется критическими напряжениями и деформациями при термоциклировании материала через интервал температур мартенситного превращения;
- установлены закономерности влияния химического состава и структуры, формирующейся в процессе деформации и термомеханической обработки на критические напряжения и деформации сплавов на основе никелида титана в условиях термоциклирования;
- определено влияние схемы и параметров противодействия термомеханических актуаторов на удельную работу сплавов на основе никелида титана и условия достижения ее максимальной величины.

Полученные научные результаты диссертационной работы могут быть использованы для последующей разработки сплавов с эффектом памяти формы, обладающих повышенными термомеханическими характеристиками, для проектирования конструкций и технологий изготовления актуаторов и других функциональных устройств.

### **Рекомендации по практическому использованию основных результатов работы**

Разработанный в диссертации алгоритм выбора состава и технологии термической обработки полуфабрикатов и изделий из сплавов на основе никелида титана могут быть использованы при проектировании и производстве термомеханических актуаторов в авиакосмической промышленности (ОКБ им. Туполева, ОКБ им. Сухого, РКК «Энергия» и др.), при производстве материалов для судостроения (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей») и на др. предприятиях, а также в отраслевых и учебных институтах.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена использованием современного поверенного оборудования с лицензионным программным обеспечением, проведением испытаний и измерений в соответствии с ГОСТ и разработкой специальных методик определения термомеханических свойств материала и характеристик работоспособности изделий, хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием математической статистики при обработке результатов.

### **Замечания**

1. В работе многие особенности термомеханического поведения сплавов на основе никелида титана объясняются изменением тонкой структуры материала в процессе деформации и термической обработки. Однако электронномикроскопических или

рентгеноструктурных исследований образцов в диссертации приведено мало, что затрудняет оценку установленных в диссертации закономерностей.

2. Механическое поведение сплавов на основе никелида титана в работе изучали при деформации кручением, которая характеризуется неоднородным напряжённо-деформированным состоянием по сечению образцов. Возможно более высокие характеристики удельной работы материала были бы получены при однородной деформации растяжением, которая в диссертационной работе не рассматривалась.

3. Разработанные в диссертации рекомендации касаются выбора химического состава сплава по содержанию никеля и режимов термической обработки готового элемента актуатора. Однако, характеристики эффекта памяти формы никелида титана также определяются содержанием в нём таких примесей, как кислород, азот и углерод, а также параметрами деформации при получении полуфабриката и формы готового изделия. Однако в работе это не раскрыто.

4. В работе автор использует не общепринятые термины и характеристики с недостаточно подробным их описанием. Например, «эффективный» модуль упругости (стр. 15) и модуль сверхупругости (стр. 49) никелида титана. Это затрудняет понимание содержания диссертации.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации и общей высокой оценки работы.

Диссертационная работа Бурнаева А.В. выполнена на высоком научно-техническом уровне. Она представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены научно-обоснованные технические и технологические решения по повышению характеристик работоспособности термомеханических актуаторов из сплавов на основе никелида титана путем рационального выбора химического состава материала и оптимизации технологии его обработки.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 9 научно-технических конференциях, опубликованы в 14 печатных работах, в том числе 5 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в авиакосмической технике и судостроении, а также в других отраслях промышленности для изготовления функциональных конструкций.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-16 Положения о присуждении

ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Бурнаев Александр Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (Машиностроение).

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры «Термообработка и физика металлов» института новых материалов и технологий УрФУ, протокол № 9 от 15 ноября 2018 года. На заседании присутствовало 24 членов из 27. Результаты голосования: «за» - 24, против – нет, воздержавшихся - нет.

Заведующий кафедрой термообработки  
и физики металлов, профессор, д.т.н.



Попов Артемий Александрович

Ученый секретарь, доцент, к.т.н.

Оленева Ольга Аркадиевна

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный  
университет им. первого Президента России  
Б.Н. Ельцина». 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19  
E-mail: [rector@urfu.ru](mailto:rector@urfu.ru)  
Тел.: +7343-3754503