



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

Министерство науки и высшего образования 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 6660003190/667001001

12 НОЯ 2020

№ 01.09 - 07/626

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор по науке

А.В. Германенко

«11» \_\_\_\_\_ 2020 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
Слезова Семена Сергеевича

«Влияние водородной и ионно - плазменной обработки на структуру и комплекс свойств титанового сплава с интерметаллидным упрочнением», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

### Актуальность работы

Хорошо известно, что из всех металлических материалов сплавы на основе титана имеют лучшую биологическую совместимость с организмом человека, поэтому они наиболее часто используются для изготовления имплантируемых медицинских изделий. В то же время для изготовления медицинского инструмента в основном используются нержавеющие стали. Аустенитные нержавеющие стали, ярким представителем которых является 12X18H10T, имеют высокую коррозионную стойкость, но низкие пределы текучести ( $\leq 200$  МПа) и прочности ( $\leq 550$  МПа), что исключает возможность изготовления из них силовых ортопедических инструментов, особенно режущих и ударных (разверток, фрез, рашпилей). Использование для этих целей мартенситно-старееющих сталей, например, 40X13, позволяет в два и более раз повысить предел текучести. Однако инструмент, в отличие

от имплантируемых медицинских изделий, предназначен для многократного использования, поэтому перед каждой операцией он должен подвергаться дезинфекции и стерилизации. Последнюю обычно проводят либо паровым, либо газовым методом. К сожалению, очень часто наблюдается появление ржавчины на инструменте, изготовленном из мартенситно-старяющихся сталей, после нескольких циклов стерилизации, что исключает его дальнейшее использование.

Поэтому вопрос, связанный с выбором материала для изготовления инструмента до сих пор остается открытым. Одним из путей решения этой проблемы является использование сплавов на основе титана для изготовления силовых ортопедических инструментов. Имея более высокие пределы прочности и, особенно, предел текучести по сравнению с нержавеющей сталью, а также более высокую коррозионную стойкость, титановые сплавы могли бы составить конкуренцию нержавеющей стали. Но титановые сплавы имеют в два раза более низкий модуль упругости, который определяет жесткость конструкции и, соответственно, точность обработки костных структур, и существенно более низкую износостойкость. Перечисленные недостатки титановых сплавов делают проблемным их использование для изготовления силового инструмента.

Поэтому диссертационная работа Слезова С.С., посвященная выбору высокопрочного сплава на основе титана и разработке комплексной технологии его обработки для изготовления силовых ортопедических инструментов, является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения.

### **Общая характеристика работы**

Автором в работе дана детальная характеристика титановых сплавов разных классов, особое внимание уделено влиянию алюминия на физико-механические свойства  $(\alpha+\beta)$ -сплавов. Рассмотрено влияние термоводородной обработки и вакуумного ионно-плазменного азотирования на изменение структуры, фазового состава, механические, технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов.



Автором на основе проведенного анализа обоснован выбор опытного сплава, обеспечивающего повышенные значения модуля упругости. Показано, что под действием водорода в нем образуется интерметаллидное соединение на основе  $Ti_3Al$ . В ходе исследований уточнена температурно-концентрационная диаграмма фазового состава опытного сплава, легированного водородом. На основании проведенных исследований было разработано два режима термоводородной обработки и получено два различных типа структуры: глобулярная и бимодальная, что позволило увеличить твердость на 10 ед. HRC и прочность на 70 МПа по сравнению с отожженным состоянием.

Большое внимание автором уделено установлению закономерностей влияния горячей пластической деформации на формирование фазового состава и структуры сплава в зависимости от содержания водорода. Показано, что водород тормозит процесс рекристаллизации  $\alpha$ -фазы, но при этом способствует уменьшению размера рекристаллизованных зерен.

В работе показано, что сочетание термоводородной обработки с вакуумным ионно-плазменным азотированием с последующим нанесением нитрида позволяет не только повысить поверхностную микротвердость до 6100 МПа, но и получить опытные образцы инструмента с жесткостью на уровне, сопоставимом с жесткостью образцов из нержавеющей стали 40X13.

На заключительном этапе работы была исследована коррозионная стойкость опытного сплава после различных режимов обработки. Установлено, что сочетание термоводородной обработки с вакуумным ионно-плазменным азотированием с последующим нанесением нитрида обеспечивает максимальную коррозионную стойкость.

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

Научная новизна диссертационной работы Слезова С.С. не вызывает сомнения и заключается в следующем:

- уточнены линии переменной растворимости на температурно-концентрационной диаграмме «фазовый состав опытного сплава —

содержание водорода – температура наводороживания». Показано, что водород повышает температуру разупорядочения  $\alpha_2$ -фазы;

- установлено, что легирование водородом в двухфазной ( $\alpha+\beta$ )- области с последующим низкотемпературным двухступенчатым вакуумным отжигом приводит к формированию бимодальной структуры  $\alpha$ -фазы, обеспечивающей наибольшую эффективность последующего азотирования;

- показано, что дополнительное легирование опытного сплава водородом тормозит процесс динамической рекристаллизации  $\alpha$ -фазы, но при этом способствует уменьшению размера рекристаллизованных зерен.

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

Разработанная комплексная технология обработки сплава Ti-8,7Al-2,0Mo-1,5Zr, включающая термоводородную обработку, водородное пластифицирование, низкотемпературное вакуумное ионно - плазменное азотирование и нанесение покрытия из нитрида титана может быть успешно использована при изготовлении крупногабаритного режущего медицинского инструмента типа разверток, рашпилей, долот, фрез и др., применяемого в травматологии и ортопедии, в частности при имплантации эндопротезов крупных суставов человека

**Достоверность полученных результатов** обеспечена использованием современного поверенного оборудования с лицензионным программным обеспечением, проведением испытаний и измерений в соответствии с ГОСТ, хорошим совпадением экспериментальных данных и теоретических расчетов, использованием математической статистики при обработке результатов.

### **Замечания**

1. В таблице 3.1 на стр. 100 диссертации приведен фазовый состав опытного сплава после закалки с разных температур, в частности 850 и 900°C. В то же время на диаграмме, приведенной на рис. 3.12, температуры разупорядочения  $\alpha_2$ -фазы в зависимости от содержания



водорода находятся внутри этого температурного интервала. Как были определены эти температуры и с какой точностью, не ясно.

2. Медицинские инструменты подвергаются коррозии не при кратковременном взаимодействии с тканями организма, которые достаточно хорошо имитируются испытаниями в 0,9% водном растворе NaCl, а в процессе очистки и дезинфекции, поэтому необходимо обосновать принятые в работе условия испытания.
3. На рисунке 5.1, стр. 139, приведены участки дифрактограмм образцов после различных режимов обработки. Непонятно, что это за фазы, обозначенные автором как  $\alpha'$  и  $\alpha''$  и почему они обозначены одним индексом? Если один из дифракционных максимумов принадлежит  $\alpha_2$ -фазе, о наличии которой свидетельствуют отражения под малыми углами, то ее индексы отличаются от  $\alpha$ -фазы.
4. В диссертации есть опечатки, например, страница 138 заканчивается предложением, с которого начинается 141 страница.

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

Диссертационная работа Слезова С.С. 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 жесткости и износостойкости режущих инструментов из опытного титанового сплава Ti-8,7Al-2,0Mo-1,5Zr путем применения разработанной комплексной технологии, основанной на обратимом легировании водородом и вакуумном ионно-плазменном азотировании.

Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 10 научно-технических конференциях, опубликованы в 18 печатных работах, в том числе в 8 статьях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, из которых 2 статьи опубликованы в журналах, включенных в международные системы цитирования. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в медицине и авиакосмической технике, а также в других отраслях промышленности.

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 Слезов Семен Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Отзыв рассмотрен на заседании кафедры термообработки и физики металлов» института новых материалов и технологий УрФУ, протокол № 11 от 9 ноября 2020 года. На заседании присутствовало 27 членов из 32. Результаты голосования: «за» - 27, против – нет, воздержавшихся - нет.

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

Попов Артемий Александрович

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.: +7343-3745964

ПОДПИСЬ  
ЗАВЕРЯЮ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ УРФУ  
МОРОЗОВА В.А.

