

ОТЗЫВ

официального оппонента Давыдова Дениса Игоревича на диссертационную работу Ледера М.О. «Оптимизация состава сплава ВТ18У с целью повышения комплекса служебных свойств», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Диссертационная работа Ледера Михаила Оттовича посвящена изучению влияния химического состава сплава и режимов термической обработки на структуру и механические свойства жаропрочного титанового сплава ВТ18у. Повышение механических свойств и жаропрочности титановых сплавов является важной материаловедческой задачей в связи с широким использованием таких сплавов в современной авиационной технике. В этой связи задачи экспериментального исследования сформулированные в диссертации, являются **актуальными**.

Структура и основное содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка цитируемой литературы из 143 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 117 страниц. Диссертационная работа содержит 62 рисунков, 43 формулы и 33 таблицы.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, представлены научная новизна и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности, апробация полученных результатов и отражается личный вклад автора.

В **первой главе** приведен анализ литературных источников. В главе перечислены основные особенности и требования к современным жаропрочным титановым сплавам. В обзоре химические эквиваленты, применяемые для анализа влияния легирующих элементов на фазовый состав и механические свойства используются. Особое внимание уделено интегральным характеристикам химического состава, химическим эквивалентам. Показаны принципы легирования жаропрочных титановых

сплавов. Также подробно рассмотрены механизмы ползучести и влияние легирования на структуру и свойства титановых жаропрочных сплавов.

В целом данная глава дает широкое представление о накопленных данных и направлении предстоящего исследования. На основании проведенного анализа литературных данных сформулирована цель и основные задачи работы.

Во **второй главе** представлены материалы исследования, термические обработки и методики исследования. Материалом исследования служили титановые сплавы ВТ18у и ВТ9 экспериментальных составов. В работе использованы образцы, вырезанные из штампованных дисков и прутков, которые были изготовлены из слитков массой 20 кг, выплавленных методом двойного вакуумно-дугового переплава с расходуемым электродом.

В работе были использованы методы изучения структуры: оптическая металлография, просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия, микрорентгеноспектральный анализ и рентгеновская дифрактометрия. Проведены механические испытания, испытания на жаростойкость методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК). В главе уделено внимание методологическому описанию статистического анализа, вводится количественная характеристика понятия «комплекса механических свойств».

В **третьей главе** исследовано влияние режимов термической обработки и влияние варьирования легирующих элементов в пределах марки сплава ВТ18У на механические свойства, микроструктуру и выделение интерметаллидных фаз в штамповке типа «ДИСК». В главе рассмотрены типы выделяющихся силицидных частиц, а также их влияние на выделение α_2 -фазы. На основании проведенных исследований предложен режим первой ступени термообработки для сплава ВТ18У.

Далее был проведен анализ влияния содержания легирующих элементов, на расширенный комплекс механических свойств сплавов типа ВТ18у: испытания КСТ, длительной прочности, ползучести и усталости. Повышение концентрации легирующих элементов в пределах марки сплава

активизирует выделение большей объемной доли интерметаллидных частиц при старении, приводя к более значительному эффекту дисперсионного твердения сплава, что способствует формированию более высокого комплекса прочностных характеристик.

На основании ограничений по химическим эквивалентам и комплексам механических свойств был определён оптимальный химический состав сплава ВТ18у, позволяющий получать изделия с повышенными значениями механических свойств. Приводятся рекомендации по выбору режимов термической обработки для сплава ВТ18у.

В четвертой главе приведены результаты оценки комплексного влияния железа, никеля и хрома на ползучесть и длительную прочность сплава ВТ18у. результаты испытаний на разрыв при температуре 600 °С, а также вязкость разрушения K_{ICU} и K_{IC}T

Установлено, что для сплава ВТ18у содержания примесей Fe, Ni и Cr оказывает значительное влияние на характеристики жаропрочности. Уменьшение содержания примесей в сплаве приводит к уменьшению общей пластической деформации при ползучести и увеличению длительной прочности.

В пятой главе изучалось влияние добавки гадолиния на формирование структуры, фазового состава, механические свойства и кинетику окисления сплавов на основе ВТ18у и ВТ9. Показано, что легирование гадолинием приводит к существенному уменьшению размера зерна, росту пластических характеристик при комнатной и повышенной температуре. Установлено, гадолиний, в основном, не растворен в матрице, а выделяется в виде отдельных частиц второй фазы.

Изучена жаростойкость сплавов при изотермической выдержке в интервале температур 600...800 °С. В сплаве ВТ18у процессы окисления протекают с меньшей интенсивностью, чем в сплаве ВТ9. Дополнительное введение в составы сплавов гадолиния приводит к ускорению процессов окисления в сплаве ВТ9, что обусловлено наличием в структуре оксидов

гадолиния Gd_2O_3 , выделенных по границам зерен и межфазным границам раздела. Установлено, что в процессе окисления для сплавов ВТ9 и ВТ18у формируется оксидная пленка, состоящая из нескольких чередующихся друг с другом слоев оксидов алюминия и титана.

В разделе «**Общие выводы**» представлены основные результаты в форме шести выводов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. В работе предложены численные комплексы механических свойств, на основании которых возможна оценка качества готовых изделий.

2. Показано для сплава ВТ18у зависимость отдельных механических свойств от химических эквивалентов теории Юм-Розери и эквивалента по кислороду. Проведена оптимизация химического состава сплава ВТ18у на основе ограничений по химическим эквивалентам и связи их с комплексами механических свойств.

3. Исследовано влияния легирования сплава гадолинием на структуру и механические свойства прутков изготовленных из сплава ВТ18у. Показано, что при легировании возрастают и прочностные и пластические характеристики, однако уменьшается ударная вязкость КСТ и снижается длительная прочность, значительно уменьшается размер зерна.

Результаты работы соответствуют поставленным целям и задачам. **Достоверность** экспериментальных результатов, научных положений, выносимых на защиту, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием современных взаимодополняющих методов исследования и согласованностью работы с более ранними литературными данными.

Особую **практическую значимость** имеют, прежде всего, разработанный режим термообработки и предложенный оптимизированный химический состав для сплава ВТ18у, позволяющие получать более высокие механические свойства изделий. В работе показано отрицательное влияние примесей Fe, Ni и Cr на ползучесть, длительную прочность и вязкость разрушения. Кроме этого следует отметить методологические аспекты работы

в виде предложенной характеристики качества изделий на основании комплексных показателей механических свойств.

По теме диссертации представлено шесть статей, входящих в перечень ВАК, из них четыре статьи - в международных журналах индексируемых в базах данных в Web of Science и Scopus. Также по результатам работы получен патент.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации и опубликованным работам.

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Учитывалось ли влияние анизотропии при вырезке образцов из штампованных дисков для проведения механических испытаний?

2. В работе вводится понятие «комплекса механических свойств». В этом случае возникает несколько вопросов: Достаточен ли выбор данных механических свойств для оценки качества изделия? Почему, например, не учитывается длительная прочность в уравнениях (16) и (17)? Чем обусловлен выбор коэффициенты в знаменателе в уравнении(17)? Чем отличаются формулы определения низкотемпературного и высокотемпературного коэффициентов (16) и (17) от формул (20) и (21) соответственно? Достаточно ли количества образцов, использованных в работе для проведения статистического анализа?

3. В главе 3 не приведены данные ДСК, которые автор использует для выбора режимов термообработки.

4. В главе 4 большое внимание уделяется влиянию химического эквивалента на механические свойства сплава ВТ18у, но отсутствует пояснение о возможных причинах увеличения длительной прочности при снижении содержания примесей.

Указанные замечания не затрагивают основных положений, вынесенных автором на защиту и не сказываются на общей положительной оценке диссертационной работы.

Заключение по работе

Диссертационная работа Ледера М.О. «Оптимизация состава сплава ВТ18У с целью повышения комплекса служебных свойств» полностью удовлетворяет требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ».

Представленная диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, связанную с изучением влияния химического состава и режимов термической обработки на структуру и механические свойства жаропрочного титанового сплава, а ее автор, Ледер Михаил Оттович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов

Официальный оппонент:

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики металлов имени М. Н. Михеева»

Уральского отделения Российской академии наук.

Давыдов Денис Игоревич

Дата подписания отзыва: «20» января 2022 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Почтовый адрес: 620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

E-mail: davidov@imp.uran.ru

Телефон: 8(343) 378-37-11

