

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА

Зацепина Веселина Алексеевна

*Студент 5 курса,
кафедра «Материаловедение»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ночовная Н.А.,
доктор технических наук, начальник лаборатории титановых сплавов ГНЦ ФГУП
«ВИАМ»*

Введение

Важнейшими научными проблемами современного материаловедения являются создание новых конструкционных материалов и эффективных технологий их производства.

Первостепенная роль в решении этих задач принадлежит разработкам жаропрочных сплавов. Важность этой проблемы связана с тем, что они являются основными конструкционными материалами во многих ведущих отраслях машиностроения.

В настоящее время используется большое количество жаропрочных сплавов, работающих в широком интервале температур и сред, которые должны соответствовать необходимым минимальным критериям качества и назначения.

Несмотря на то, что разработка таких материалов является сложной научно-технической задачей, получаемая экономия от снижения массы конструкции, уменьшения расхода топлива и стоимости обслуживания и ремонта, обеспечивает высокую экономическую эффективность при использовании таких материалов.

Перспективные жаропрочные материалы на основе алюминидов титана

Проблема разработки новых легких жаропрочных сплавов с рабочими температурами больше 550-600°C уже давно не теряет своей актуальности, поскольку этот диапазон температур превосходит технические возможности обычных титановых сплавов. В связи с этим представляет большой интерес изучения нового класса материалов – сплавов на основе интерметаллидов титана. В зависимости от количества β -стабилизаторов интерметаллиды подразделяются на «альфа-2»-сплавы/«супер-альфа-2»-сплавы, «гамма»-сплавы и «орто»-сплавы.

Рассмотрим их подробнее.

«Альфа-2» - сплавы

Первый сплав этого типа СТ5, разработан Корниловым И.И. и сотрудниками. Фазовый состав: ≥ 95 (об.%) α_2 -фазы + < 5 (об.%) β -фазы с игольчатой формой «альфа-2»-фазы. Из сплава изготавливались слитки, деформированные полуфабрикаты – слябы, штамповки, прутки.

Несмотря на высокие удельные прочностные и жаропрочные свойства эти малолегированные «альфа-2»-сплавы имели при комнатной температуре малую пластичность, ударную вязкость и низкую технологичность при переработке слитков в конечные полуфабрикаты. Трудности изготовления полуфабрикатов из-за высоких усилий деформирования, невозможность получения различных типов микроструктур, вследствие малого содержания β -фазы, пониженная стойкость к окислению, привели к

разработке сплавов с увеличенным количеством β -фазы. Это достигнуто легированием матрицы $Ti_3Al > 10 Nb$ (ат.%). Для упрочнения β -фазы, проводили легирование тугоплавкими элементами – Mo, V, Zr и Si. Сплавы такого типа получили название – «супер-Альфа-2»-сплавы.

«Супер-альфа-2» - сплавы

Типичными представителями этой группы сплавов являются: Ti-24-10-3-1 (США), ВТИ-2 (РФ) и ТД-2 (Китай). Ti-24-10-3-1 основан на системе Ti-24Al-10Nb-3V-1Mo (ат.%) и изготавливается по технологии титановых сплавов. Из сплава изготавливаются различные полуфабрикаты – от слябов (штамповок) до листов и фольги. Типичная термообработка для стабилизации структуры полуфабрикатов – закалка из $(\alpha_2+\beta)$ -области и старение $(800-850)^\circ C$. Типичная структура полуфабрикатов (прутков и листов) – (20-30) (об.%) первичной равноосной α_2 -фазы и (50-60) (об.%) тонкопластинчатой вторичной α_2 -фазы в матричной β -фазе. В сплавах, содержащих Si, в структуре могут присутствовать сложные силициды, упрочняющие β -фазу. Несмотря на повышение пластических свойств, «супер-альфа-2»-сплавы не обладали необходимой технологичностью для получения высококачественных деформированных полуфабрикатов – штамповок, прутков и листов, а присутствие в них непластичной «альфа-2»-фазы, не обеспечивало дальнейшее повышение пластичности. По этой причине «супер-альфа-2»-сплавы имеют низкие характеристики ударной вязкости и вязкости разрушения, что в целом ограничивает использование их в основном корпусными деталями.

«Гамма» - сплавы

В зависимости от содержания основного компонента Al различают однофазные и двухфазные «гамма»-сплавы.

Однофазные «гамма»-сплавы, содержащие более 51 Al (ат.%), оказались малопрочными и непластичными материалами и операции горячей деформации, не изменяя их структуру (за исключением размеров зерен), не улучшали их механических свойств. Легирование таких сплавов 5(Nb+Ta) (ат.%) не повышало механических свойств, но приводило к возрастанию жаропрочности.

«Гамма»-сплавы, содержащие менее 51 Al (ат.%), являются двухфазными сплавами. В качестве второй фазой присутствует и Ti_3Al , количество которой зависит от содержания Al: при 50 Al (ат.%) ее ~ 5 (об.%), а при 47 Al (ат.%) ~ 25 (об.%). Такая зависимость фазового состава от содержания Al оказывает сильное влияние на структуру и механические свойства «гамма»-сплавов.

Исследования двухфазных сплавов показали, что только литые Ti-(47-49) Al (ат.%) в структуре которых присутствовало (10-15) (об. %) «альфа-2»-фазы с тонкопластинчатой структурой, обладали наилучшими механическими свойствами: $\sigma_{B}^{20}=(520-480)$ МПа и $\delta^{20} = (2,5-2,7)\%$. При уменьшении содержания Al в сплавах увеличивались прочностные свойства, а при увеличении содержания Al они уменьшались. Особенно резко изменялось относительное удлинение, которое падало с 2,5 % до (0,5-1) %.

Поскольку литые структуры были структурно неоднородны и имели невысокие механические свойства, то с помощью операций термомеханической обработки (ТМО) в $(\gamma+\alpha_2)$ -области проводилось измельчение и формирование дисперсной глобулярной структуры, которая показала некоторое улучшение пластичности при небольшом повышении прочностных свойств. Однако даже в таком состоянии сплавы оставались малоприспособными для практического применения.

Наибольшее повышение механических свойств «гамма»-сплавов достигнуто за счет снижения содержания Al до (45-48) (ат.%) и легированием их до 10 (ат.%) тугоплавкими элементами. Сплавы имеют состав $Ti-(45-48)Al-(1-3)(Cr+Mn+V+Zr)-(1-5)(Nb+Ta+Mo+W+Re)-(0,1-2)(B+Si+C)$ (ат.%). В структуре присутствует (20-15) (об.%) α_2 -фазы + (10-15) (об.%) β -фазы + некоторое количество карбидов, силицидов или их совместных соединений (остальное γ -фаза). Оптимизация свойств по параметрам «прочность-пластичность-жаропрочность» – обеспечивалась ТМО в ($\gamma+\alpha$)-области, ТО в α -области и регламентированным охлаждением до температур, продолжительной выдержкой и последующим охлаждением. Получаемые после такой термообработки почти пластинчатые или пластинчатые структуры, обладали повышенной прочностью при обычной и рабочих температурах, хорошей низкотемпературной пластичностью и повышенной жаропрочностью. Несмотря на использование различных систем легирования сплавов и формирования в них различных типов структур, на сегодняшний день не удалось получить на «гамма»-сплавах повышенный уровень прочностных, пластических и жаропрочных свойств: для сплавов, имеющих повышенные пределы прочности, соответствуют низкие значения пластичности и жаропрочности, а при снижении пределов прочности в сплавах повышаются пластические и жаропрочные характеристики.

«Орто»-сплавы

Отмечается, что основными преимуществами этих сплавов являются:

- высокие упругие, прочностные и пластические характеристики;
- низкий коэффициент термического расширения;
- высокие характеристики МЦУ (малоцикловая усталость) и МнЦУ (многоцикловая усталость);
- меньшие значения СРТУ (скорость роста трещины усталости);
- лучшие жаропрочные свойства при температурах (500- 650)°C;
- высокая жаростойкость.

При легировании ИС Ti_3Al ниобием в количествах более 10 (ат.%) в структуре сплавов появляется новая упорядоченная фаза Ti_2AlNb («орто»-фаза) или ИС Ti_2AlNb . Исследования физико-механических свойств ИС Ti_2AlNb показали, что эта фаза имеет более высокую температуру плавления, низкий коэффициент термического расширения, лучшую теплопроводность, большую прочность, пластичность и технологичность, чем у сплавов «супер-альфа-2». При температурах 650-750°C температура снижения модуля упругости значительно меньше, чем у «супер-альфа-2»-сплавов, что может свидетельствовать о его хороших жаропрочных свойствах. Главными недостатками ИС Ti_2AlNb будут повышенная плотность и усложненность металлургического производства вследствие большего содержания тугоплавких легирующих элементов. В ранее опубликованных работах было показано, что легирование «орто»-фазы ванадием способствует повышению низкотемпературных прочностных и пластических свойств сплава, а легирование цирконием, молибденом и кремнием повышает его жаропрочные свойства и стойкость к окислению. Несмотря на достоинства этих сплавов, за рубежом до сих пор не освоен в опытно-промышленном масштабе какой-либо «орто»-сплав. Это связано с тем, что подобные сплавы оказались достаточно сложными в металлургическом производстве. Необходимость использования для легирования более дорогих элементов – Nb, Ta и W при повышенном их содержании в сплавах, обеспечение высокой однородности состава слитков, применение прокатного и термического оборудования с защитной атмосферой (вакуумом или инертным газом), жесткий контроль макро и микроструктуры в полуфабрикатах – главные причины торможения промышленного освоения этого класса сплавов.

Возможные области применения алюминидов титана

Применение жаропрочных материалов на основе алюминидов титана:

- Авиационная промышленность:
 - Для деталей горячего тракта газотурбинных двигателей:
 - Для деталей компрессора
 - Сопловые и рабочие лопатки
 - Кольца, корпуса, панельные конструкции
- Энергетическое машиностроение:
 - Стационарные турбины электрогенераторов
 - Энергетические установки
- Транспортное машиностроение
 - Поршневые и дизельные двигатели
- Газо – и нефтеперерабатывающие установки химической промышленности
- Атомное машиностроение
 - Первая стенка термоядерного реактора
- В качестве материалов-заменителей, которые создают дополнительную экономию дефицитных материалов.

Рассмотрим условия работы деталей в каждой области машиностроения:

- Энергетическое машиностроение.

В стационарных турбинах электрогенераторов пар в начальном состоянии находится под давлением от 3,4 – 8,8 МПа при температуре 435 – 535°C. В газотермических установках температура газов перед турбиной может достигать 1200°C, но благодаря системе охлаждения температуру можно снизить до приемлемой.

- Транспортное машиностроение.

В поршневых и дизельных двигателях температура достигает 300°C при давлении в 1,96 МПа и среднем эффективном вращающем моменте 1500 – 1750 об/мин.

- Газо – и нефтеперерабатывающие установки химической промышленности

Температура газа находится в диапазоне 230 - 340°C при избыточном давлении 0,02 – 0,06 МПа, с производительностью до 3 т/сутки.

- Атомное машиностроение

Применение данных сплавов приемлемо в первой стенке термоядерного реактора, температура которого составляет от 800 - 1000 °C. Необходим высокий уровень жаропрочности, жаростойкости, при малой плотности, малой наведенной активности.

Среди всех выше перечисленных возможных областей применения жаропрочных материалов на основе алюминидов титана наиболее жесткие требования предъявляются к деталям авиационной промышленности, они будут рассмотрены позднее. Поэтому добившись приемлемых результатов по улучшению основных свойств данной группы сплавов этих деталей, можно судить об их применении в других производственных областях.

Были проведены исследования по разработке сплава системы Ti-Al-Nb, высокопрочного пожаробезопасного титанового сплава и технологии производства слитков и полуфабрикатов из этого сплава для деталей компрессора высокого

давления. Требования к материалу: уровень прочности 1000 – 1100 МПа с рабочей температурой до 650°C. Относительное удлинение 5%, плотность 5,3 г/см².

С целью определения физических характеристик высокопрочного пожаробезопасного титанового сплава, исследования микроструктуры и проведения химического анализа распределения легирующих элементов по сечению полуфабрикатов (штамповка диска (шайба), лопаточные заготовки), полуфабрикаты были разрезаны на заготовки под образцы, с последующим проведением термической обработки (ТО) по выбранному оптимальному режиму: нагрев до температуры 1090 °С, выдержка 1 час, охлаждение вместе с печью до 860 °С, старение при этой температуре в течение 6 часов и охлаждение на воздухе до комнатной температуры.

Микроструктура полуфабрикатов (штамповка диска (шайба), лопаточные заготовки) из высокопрочного пожаробезопасного титанового сплава в исходном состоянии и после ТО представлена на рисунке 1.

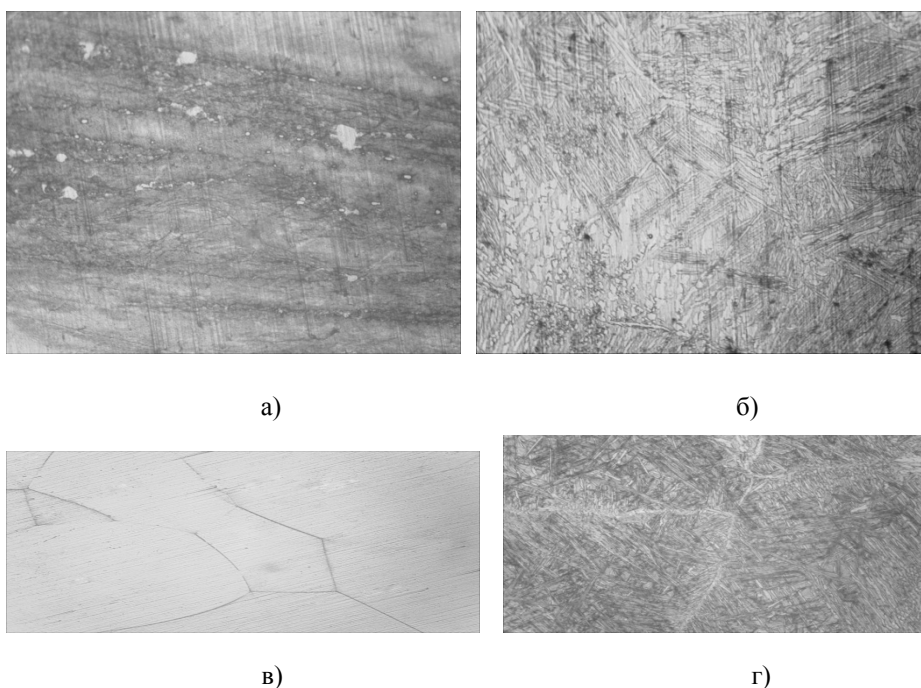


Рис. 1. Микроструктура полуфабрикатов: лопаточная заготовка:
а) в исходном состоянии, б) после ТО, штамповка диска (шайба):
в) в исходном состоянии, г) после ТО.

В результате проведенного металлографического исследования установлено, что микроструктура лопаточных заготовок в исходном состоянии имеет вытянутые вдоль осевого направления зерна «B2»-фазы размером 1500 мкм, которые после ТО в результате рекристаллизации приобретают равноосную форму размером (50 – 500) мкм с тонкопластинчатой внутризеренной структурой пластинчатых (длиной до 60 мкм) и дисперсных (размером до 11 мкм) выделений «О»-фазы. Микроструктура штамповки диска (шайбы) в исходном состоянии представлена зернами «B2»-фазы размером (350 – 800) мкм. После ТО внутризеренная структура состоит из пластинчатых (размером 30 мкм) и дисперсных (размером 10 мкм) выделений «О»-фазы.

С целью изучения качества и химической однородности полученных полуфабрикатов (штамповка диска (шайба), лопаточные заготовки) из высокопрочного пожаробезопасного титанового сплава было проведено исследование распределения легирующих элементов по сечению полуфабрикатов, изготовленных из трех разных слитков. Исследование распределения легирующих элементов по сечению полуфабрикатов (штамповка диска (шайба), лопаточные заготовки) проводилось тремя методами:

- спектральный анализ;
- атомно-эмиссионный анализ с индуктивно связанной плазмой в качестве источника возбуждения;
- атомно-абсорбционный анализ.

Результаты спектрального анализа полуфабрикатов (штамповка диска (шайба), лопаточные заготовки) из высокопрочного пожаробезопасного титанового сплава представлены в таблице 1.

Таблица 1. Распределение легирующих элементов по сечению полуфабрикатов (штамповка диска (шайба), лопаточные заготовки) из высокопрочного пожаробезопасного титанового сплава.

Полуфабрикат	Направление	Среднее значение содержания элементов, % масс.						
		Al	Nb	V	Zr	Mo	W	Si
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Спектральный анализ								
Лопаточная заготовка (слиток 10029)	Верхняя плоскость	12,2	40,50	1,37	2,57	1,05	0,54	0,21
	Центральная плоскость	12,4	40,53	1,34	2,60	1,08	0,57	0,20
	Нижняя плоскость	12,2	40,37	1,39	2,61	1,05	0,55	0,21
Лопаточная заготовка (слиток 10032)	Верхняя плоскость	12,3	40,50	1,35	2,58	1,04	0,56	0,20
	Центральная плоскость	12,3	40,57	1,35	2,59	1,07	0,53	0,20
	Нижняя плоскость	12,3	40,50	1,37	2,57	1,05	0,55	0,21
Штамповка диска (шайба) (слиток 10035)	Верхняя плоскость	12,3	40,58	1,34	2,58	1,06	0,54	0,20
	Центральная плоскость	12,4	40,68	1,37	2,61	1,05	0,56	0,22
	Нижняя плоскость	12,3	40,43	1,37	2,58	1,06	0,54	0,21

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Требования ТУ		12-13	39-41	1,2-1,8	2,2-2,8	0,7-1,3	0,4-0,6	0,17-0,23

Из таблицы видно, что среднее значение по каждому основному легирующему элементу соответствует диапазону, указанному в ТУ 1-595-8-1150-2010 «Слитки из высокопрочного пожаробезопасного титанового сплава марки ВИТ2».

Спектральный анализ не выявил отклонений в распределении легирующих элементов по сечению полуфабрикатов. Наблюдается соответствие значений в полуфабрикатах (штамповка диска (шайба), лопаточные заготовки), изготовленных из трех разных слитков, следовательно, их можно считать химически однородными.

С целью уточнения химического состава полуфабрикатов (штамповка диска (шайба), лопаточные заготовки) по разработанной методике измерений МИ 1.2.016-2010 «Определение химического состава высокопрочного пожаробезопасного титанового сплава» были проведены атомно-эмиссионный анализ с индуктивно связанной плазмой в качестве источника возбуждения и атомно-абсорбционный анализ. В связи с тем, что данные спектрального анализа не выявили химической неоднородности по сечению полуфабрикатов, анализы проводились только в одной плоскости: центральной (Таблица 2)

Таблица 2 – Распределение легирующих элементов по сечению полуфабрикатов (штамповка диска (шайба), лопаточные заготовки) из высокопрочного пожаробезопасного титанового сплава.

Полуфабрикат	Направление	Среднее значение содержания элементов, % масс.						
		Al	Nb	V	Zr	Mo	W	Si
Атомно-эмиссионный анализ								
с индуктивно связанной плазмой в качестве источника возбуждения								
Лопаточная заготовка (слиток 10029)	Центральная плоскость	12,4	39,73	1,46	2,47	0,99	0,50	0,20
Штамповка диска (шайба) (слиток 10035)	Центральная плоскость	12,3	39,70	1,47	2,48	0,99	0,49	0,19
Атомно-абсорбционный анализ								
Лопаточная заготовка (слиток 10029)	Центральная плоскость	12,3	39,87	1,43	*	*	*	0,18
Штамповка диска (шайба) (слиток 10035)	Центральная плоскость	12,3	39,75	1,40	*	*	*	0,19
Требования ТУ		12-13	39-41	1,2-1,8	2,2-2,8	0,7-1,3	0,4-0,6	0,17-0,23

*Методика атомно-абсорбционного анализа не предусматривает определение данных элементов.

Как видно из представленных данных, химический состав полуфабрикатов полностью однороден и соответствует расчетному шихтовому составу. Также стоит отметить, что результаты атомно-эмиссионного анализа имеют более точные и близкие к расчетному шихтовому составу значения.

Данные исследования являются лишь этапом из всего технического задания по разработке сплава. Но уже можно сделать вывод о дальнейших результатах, а на основе

этого уже о дальнейшем внедрении и применении данного сплава.

Выводы

Проведенный анализ свойств жаропрочных интерметаллидных титановых сплавов показал, что наиболее перспективными для использования являются сплавы на основе интерметаллида Ti_2AlNb («орто»-фаза), которые по уровню механических свойств (прочности, пластичности, жаропрочности и технологичности) превосходит титановый сплав ВТ18У и интерметаллидный сплав ВТИ-2 (сплав на основе «альфа-2»-фазы).

Несмотря на то, что известно достаточно большое число деформируемых «орто»-сплавов с высоким комплексом механических свойств, до сих пор нет исследований, посвященных интерметаллиду Ti_2AlNb , являющемуся основой этих сплавов. Изучение структуры и свойств именно базового сплава Ti_2AlNb является ключевым моментом для создания основы технологий выплавки слитков, деформации и термической обработки для сплавов серии «орто», что в последствии позволит разработать технологические процессы производства из них крупногабаритных деталей.

Литература

1. Анташев В.Г., Ночовная Н.А., Павлова Т.В., Подюкова Н.М., Иванов В.И. //Авиационные материалы «ВИАМ», 1932 – 2002 гг./ Юбилейный научно – технический сборник под общей редакцией член. кор. РАН Каблова Е.Н. – 2002. – С. 111-115.
2. Борисова Е.А., Скляр Н.М. Горение и пожаробезопасность титановых сплавов. /Под ред. Е. Н. Каблова. – М.: ВИАМ, 2007. – 87 с.
3. Иванов В.И., Каблов Е.Н., Анташев В.Г., Савельева Ю.Г. Патент Россия 2210612 (МКИ С22с14/00) 2003 «Сплав на основе титана и изделие, выполненное из него».