

УДК 669.018.44:669.295

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИСТОВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ti_2AlNb

С. В. СКВОРЦОВА, А. А. ИЛЬИН, А. М. МАМОНОВ,
Н. А. НОЧОВНАЯ, О. З. УМАРОВА

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)" (МАИ)*

Изучено влияние двухступенчатой термической обработки на формирование фазового состава, структуры и механические свойства листового полуфабриката из жаропрочного сплава ВТИ-4 на основе интерметаллида Ti_2AlNb . Выявлено, что, изменяя температуру нагрева первой ступени обработки и температуру последующего старения, удается в широком диапазоне изменять его характеристики прочности и пластичности. Установлено, что для получения структуры, обеспечивающей относительное удлинение 8...12%, температура первой ступени обработки должна находиться в трехфазной ($\beta+\alpha_2+O$)-области, а охлаждать до комнатной температуры или до температуры второй ступени обработки (800...850°C) необходимо с печью. Чтобы обеспечить высокие кратковременную и длительную прочность при 650°C с сохранением умеренных значений пластичности (3...5%), охлаждать после изотермической выдержки в трехфазной области нужно на воздухе, а последующее старение осуществлять в интервале температур 800...850°C в течение 7 ч.

Ключевые слова: жаропрочный титановый "орто"-сплав, термическая обработка, структура, фазовый состав, прочность, пластичность.

В последние годы ведутся интенсивные исследования и технологические разработки по созданию и внедрению в производство жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана, предназначенных для длительной эксплуатации при 600...700°C в условиях интенсивного коррозионного воздействия газовой среды и высоких знакопеременных нагрузок. Эти материалы по удельной прочности при температурах до 700°C имеют преимущество перед никелевыми сплавами и жаропрочными сталями, а по уровню рабочих температур превосходят промышленные жаропрочные титановые сплавы [1–3].

Для улучшения механических свойств интерметаллидных соединений Ti_3Al и $TiAl$ используют многокомпонентное легирование активными тугоплавкими β -стабилизирующими элементами (Nb, Mo, V, Ta и W), которые повышают упругие и прочностные характеристики и снижают интенсивность окисления.

В настоящее время сплавы на основе $TiAl$ ("гамма"-сплавы) наиболее перспективны в условиях предельных рабочих температур. Они обладают высокой жаропрочностью, но имеют крайне низкую пластичность при комнатной температуре [4, 5]. Сплавы на основе интерметаллида Ti_3Al (типа "супер-альфа-2") деформируются в горячем состоянии, но только с малыми степенями деформации и скоростями, и обладают неудовлетворительными литейными свойствами [6, 7].

Сегодня наиболее перспективными считают "орто"-сплавы на основе интерметаллида Ti_2AlNb . Кроме того, их рассматривают в качестве альтернативы по-

Контактная osoba: С. В. СКВОРЦОВА, e-mail: skvorcovasv@mati.ru

жароопасным титановым сплавам [8–10]. Основным преимуществом “орто”-сплавов перед сплавами на основе Ti_3Al и $TiAl$ является более высокая технологическая пластичность, что позволяет изготавливать из них деформированные полуфабрикаты и заготовки сложной формы. Среди основных технологических задач – не только обеспечить однородность химического состава слитков [11] и оптимизировать параметры горячей деформации для получения качественных полуфабрикатов [12, 13], но и научно обосновать выбор режимов их термической обработки для достижения требуемого структурно-фазового состояния и комплекса механических свойств.

Ниже исследовано влияние режимов термической обработки на формирование структуры и свойства листового полуфабриката из титанового “орто”-сплава ВТИ-4.

Материалы и методы. Исходным материалом для исследований был листовый полуфабрикат толщиной 10 мм из жаропрочного “орто”-сплава ВТИ-4 на основе интерметаллида Ti_2AlNb ($Ti-11Al-40Nb-1,5Zr-0,75V-0,75Mo-0,2$ mass.% Si), полученный по опытно-промышленной технологии в АО “Чепецкий механический завод” ковкой вначале в β -, а затем в ($\beta+O$)-областях.

Термически обрабатывали в печи с воздушной атмосферой СНОЛ-1,6.2.5.1/9-И4. Микроструктуру изучали металлографическими методами на оптическом микроскопе Axio Observer A1m. Фотографии микроструктуры обрабатывали с помощью специализированного программного обеспечения ImageExpert Pro 3. Рентгеноструктурный фазовый анализ выполняли на дифрактометре ДРОН-7 в фильтрованном CuK_{α} -излучении.

Для кратковременных механических испытаний на растяжение при нормальной температуре (согласно ГОСТ 1497-84) использовали универсальную машину TIRA-test 2300, а при температуре 650°C (согласно ГОСТ 9651-84) – машину ИР 5113, для исследований длительной прочности при 650°C (согласно ГОСТ 10145-81) – машину ZST2/3-ВИЭТ.

Результаты и их обсуждение. Термическая обработка жаропрочных титановых сплавов должна обеспечивать получение термически стабильных структур. Обычно она охватывает две ступени: высокотемпературную и низкотемпературную, причем вторая ступень должна быть как минимум на 50...100°C выше температуры эксплуатации [14]. Исследовали влияние температуры обеих ступеней на формирование структуры и свойства листового полуфабриката из сплава ВТИ-4.

Методом пробных закалок определили [15] температурные границы его фазовых областей: при температурах выше 1050°C существует $\beta(B2)$ -область, в интервале 1000...1050°C – двухфазная ($\beta+\alpha_2$), при 980°C – трехфазная ($\beta+\alpha_2+O$), в диапазоне 950...800°C – двухфазная ($\beta+O$)-область. Эти данные взяли за основу, выбирая температуры термической обработки листового полуфабриката.

После высокотемпературной ступени обработки, которая должна быть ниже температуры полиморфного превращения, в структуре сплава образуется метастабильная фаза. Чем выше температура нагрева, тем большее количество высокотемпературной метастабильной фазы фиксируют в сплаве при ускоренном охлаждении. Поэтому выбрали две температуры: 1020°C, которая отвечает двухфазной ($\beta+\alpha_2$)-области, и 980°C, которая соответствует трехфазной ($\beta+\alpha_2+O$)-области. После нагрева заготовки выдерживали в течение 1 h и охлаждали на воздухе до нормальной температуры (рис. 1), а затем подвергали старению при 800°C в течение 7 h.

Из заготовок вырезали образцы для металлографического и рентгеноструктурного анализов и определения кратковременных механических свойств при

нормальной температуре. Установили, что с повышением температуры нагрева на первой ступени обработки прочность материала увеличивается, что обусловлено возрастанием в структуре количества метастабильной β (В2)-фазы, способной к распаду при последующем старении (рис. 1). Одновременно с ростом прочности снижается пластичность (табл. 1).

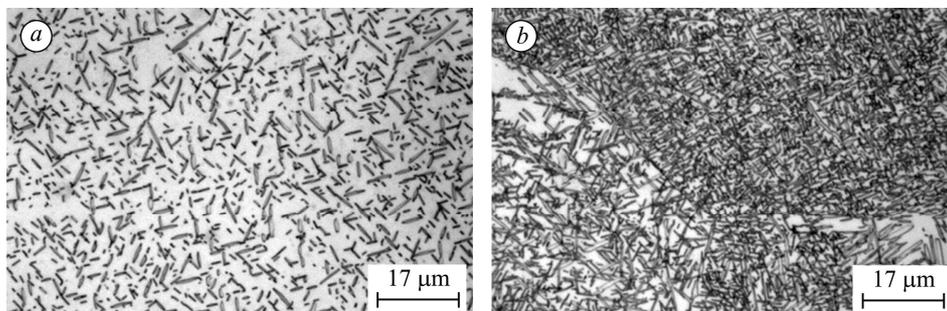


Рис. 1. Микроструктура сплава ВТИ-4 после охлаждения на воздухе от температур 1020 (а) и 980°C (b).

Fig. 1. Microstructure of ВТИ-4 alloy after air-cooling from 1020 (a) and 980°C (b).

Таблица 1. Влияние температуры нагрева на первой ступени термической обработки на механические свойства образцов из сплава ВТИ-4 после старения при 800°C в течение 7 h

Температура нагрева, °C	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
	МПа		%	
980	1170	1080	3,0	5,6
1020	1190	1120	1,4	3,0

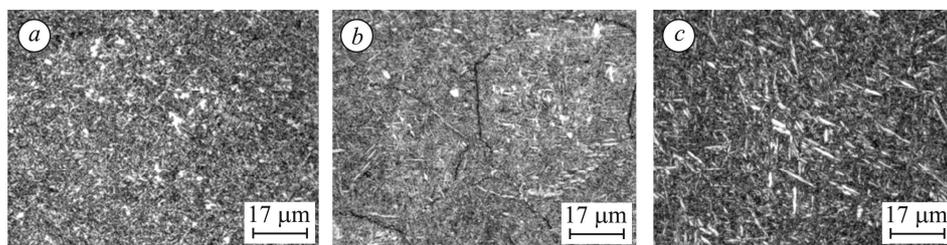


Рис. 2. Микроструктура сплава ВТИ-4 после старения в течение 7 h при 750 (а); 800 (b) и 850°C (c). Предварительно образцы охлаждали на воздухе от 980°C.

Fig. 2. Microstructure of ВТИ-4 alloy after ageing for 7 h at the temperatures of 750 (a); 800 (b) and 850°C (c). The samples were preliminary air-cooled from the temperature of 980°C.

Максимальные значения относительных удлинения и сужения имеют образцы после предварительного нагрева до 980°C. Поэтому влияние температуры старения на механические свойства сплава ВТИ-4 исследовали на образцах, которые на первой ступени обработки нагревали до 980°C. Старение при 750°C в течение 7 h приводит к существенному увеличению прочности, сопровождающемуся снижением относительного удлинения до 0,4%, что обусловлено мелкодисперсным структурным состоянием образующейся при изотермической выдержке О-фазы (рис. 2а). С повышением температуры старения до 850°C прочность постепенно

снижается, а пластичность δ увеличивается (до 5%) из-за укрупнения структурных составляющих α_2 - и O-фаз (рис. 2b, c; табл. 2).

Таблица 2. Влияние температуры старения на механические свойства образцов из сплава ВТИ-4

Температура, °С	Охлаждение после 1 h выдержки при 980°С	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
		МПа		%	
750	На воздухе	1310	1295	0,4	2,2
800		1170	1080	3,0	5,6
850		1090	960	5,0	9,4
750	С печью до комнатной температуры	1030	920	7,4	9,4
800		1010	830	8,0	10,5
850		990	790	12,0	14,8

Таким образом, установлено, что, изменяя температуру нагрева первой ступени обработки и температуру последующего старения, удается в широком диапазоне изменять характеристики прочности и пластичности сплава ВТИ-4. Причем, чем ближе температура первой ступени обработки к температуре полиморфного превращения, тем выше прочность сплава после старения, и тем ниже его пластичность.

Сплавы на основе титана и его алюминидов весьма чувствительны к скоростям нагрева и охлаждения. Вследствие низкой теплопроводности при ускоренных нагреве или охлаждении в материале могут возникать большие термические напряжения, приводящие к короблению и даже растрескиванию образцов. Поэтому далее исследовали формирование структуры и ее влияние на механические свойства образцов при охлаждении (после высокотемпературной обработки) с печью.

Обрабатывали образцы по двум схемам. Первая – нагрев до 980°С, охлаждение с печью до комнатной температуры и затем старение при 750; 800 и 850°С. По второй их охлаждали от 980°С до температуры второй ступени и выдерживали в течение 7 h. В обоих случаях охлаждали со второй ступени обработки до комнатной температуры на воздухе. Охлаждение с печью после выдержки 1 h при 980°С приводит к более полному протеканию фазовых превращений и выделению большего количества O-фазы по сравнению с охлаждением на воздухе от этой же температуры (рис. 3a и 2b). При медленном охлаждении от высокотемпературной ступени обработки и старении при различных температурах формируются практически однотипные структуры (рис. 3). Это обуславливает близкие значения прочности сплава (табл. 2). Однако с повышением температуры старения пластичность существенно увеличивается (табл. 2).

После медленного охлаждения от высокотемпературной ступени до температуры старения и последующей изотермической выдержки формируются структура и свойства, как и после охлаждения с печью до комнатной температуры и последующего старения.

Оценивали теперь жаропрочные свойства сплава. Для этого выбрали два режима обработки: нагрев до 980°С, выдержка 1 h с последующим охлаждением на воздухе до комнатной температуры и старение при 800 и 850°С в течение 7 h. Исследования на кратковременную прочность при 650°С свидетельствуют, что образцы разрушились при напряжениях 910 и 880 МПа, соответственно.

Также образцы испытывали после термической обработки по выбранным режимам на длительную прочность на базе 100 h при 650°C с нагрузкой 350 МПа. Все они разрушались после выдержки более 100 h.

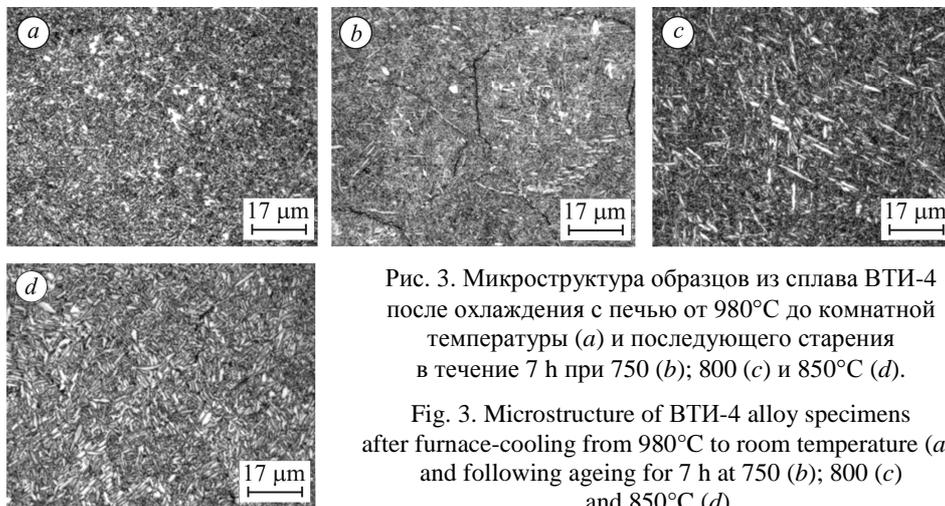


Рис. 3. Микроструктура образцов из сплава ВТИ-4 после охлаждения с печи от 980°C до комнатной температуры (a) и последующего старения в течение 7 h при 750 (b); 800 (c) и 850°C (d).

Fig. 3. Microstructure of VTИ-4 alloy specimens after furnace-cooling from 980°C to room temperature (a), and following ageing for 7 h at 750 (b); 800 (c) and 850°C (d).

ВЫВОДЫ

Таким образом, чтобы достичь повышенной пластичности сплава ВТИ-4, необходимо первую ступень обработки выполнять в трехфазной ($\beta+\alpha_2+O$)-области с последующим медленным охлаждением до второй ступени. Для получения высоких значений кратковременной и длительной прочности при повышенных температурах охлаждать после изотермической выдержки в трехфазной области необходимо на воздухе, а последующее старение осуществлять в интервале 800...850°C.

РЕЗЮМЕ. Вивчено вплив двоступеневої термічної обробки на формування фазового складу та структури, а також механічні властивості листового напівфабрикату з жароміцного сплаву ВТИ-4 на основі інтерметаліду Ti_2AlNb . Виявлено, що, змінюючи температуру першого ступеня обробки і температуру подальшого старіння, можна в широкому діапазоні змінювати характеристики міцності і пластичності сплаву. Встановлено, що для отримання структури, яка забезпечує відносне видовження 8...12%, температура першого ступеня обробки повинна знаходитися в трифазній ($\beta+\alpha_2+O$)-області, а охолоджувати до кімнатної температури або до температури другого ступеня обробки (800...850°C) слід з печі. Щоб одержати високі значення короткочасної і тривалої міцності при 650°C зі збереженням помірної пластичності (3...5%), охолоджувати після ізотермічної витримки в трифазній області слід у повітрі, а зістарювати в інтервалі 800...850°C упродовж 7 h.

SUMMARY. The effect of a two-stage heat treatment on the phase composition and structure formation, and also mechanical properties of a sheet semi-finished product made of refractory VTИ-4 based on Ti_2AlNb intermetallide is studied. It is shown that changing the heating temperature at the first stage and the temperature of the following ageing; it is possible to change the strength and plastic characteristics of VTИ-4 alloy in a wide range. It is stated that to obtain the structure, being able to provide the elongation of 8...12%, the first stage temperature should be within a three-phase ($\beta+\alpha_2+O$)-region, and cooling to the room temperature or to the second stage temperature (800...850°C) should be conducted in furnace. Cooling after isothermal holding in a three-phase region should be realized in air, and the following ageing – in the temperature range of 800...850°C for 7 h to obtain high values of short-time and long-term strength at the temperature of 650°C with moderate values of plasticity (3...5%) being kept.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ согласно постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218, ГК № 02.G25.31.0104 на оборудовании ЦКП “АКМиТ” МАИ.

1. Антипов В. В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 157–167.
2. Новак А. В., Ночовная Н. А., Павлова Т. В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД // *Тр. ВИАМ*. – 2013. – № 3 (электронный журнал). Режим доступа: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=20
3. *Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической техники* / Б. А. Колачев, Ю. С. Елисеев, А. Г. Братухин, В. Д. Талалаев; Под ред. А. Г. Братухина. – М.: Изд-во МАИ, 2001. – 412 с.
4. *Microstructural design and mechanical properties of a cast and heat-treated intermetallic multi-phase γ -TiAl based alloy* / E. Schwaighofer, H. Clemens, S. Mayer, J. Lindemann, J. Klose, W. Smarsly, V. Guthier // *Intermetallics*. – 2014. – **44**. – P. 128–140.
5. *Влияние температуры деформации на микроструктуру и механическое поведение литого интерметаллидного сплава TiAl-Nb на основе алюминидов титана γ -TiAl* / А. В. Кузнецов, Г. С. Дьяконов, Г. Д. Шайсултанов, В. С. Соколовский, Г. А. Салищев // *Науч. ведомости Белгородск. гос. ун-та. Сер. Математика. Физика*. – 2013. – **33**, № 26. – С. 132–141.
6. *Castings and Properties of Al-rich Ti–Al Alloys* / M. Paninski, A. Drevermann, G.J. Schmitz, M. Palm, F. Stein, M. Heil-Maier, N. Engberding, H. Saage, D. Sturm // *Ti-2007 Science and Technology*, The Japan Institute. – 2007. – **1**. – P. 1059–1062.
7. *Microstructure and mechanical properties of low and heavy alloyed γ -TiAl + α_2 -Ti₃Al based alloys subjected to different treatments* / V. Imayev, T. Oleneva, R. Imayev, H.-J. Christ, H.-J. Fecht. // *Intermetallics*. – 2012. – **26**. – P. 91–97.
8. *Перспективы разработки новых титановых сплавов* / В. Г. Анташев, Н. А. Ночовная, А. А. Ширяев, А. Ю. Изотова // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2011. – № S2. – С. 60–67.
9. *Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года* // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 5. – С. 7–17.
10. *Фазовые и структурные превращения в сплаве на основе орторомбического алюминидов титана* / А. А. Попов, А. Г. Илларионов, С. В. Гриб, С. Л. Демаков, М. С. Карабаналов, О. А. Елкина // *Физика металлов и металловедение*. – 2008. – **106**, № 4. – С. 414–425.
11. *Специфика плавки и способы получения слитков интерметаллидных титановых сплавов с повышенным содержанием ниобия* / Н. А. Ночовная, Е. Б. Алексеев, К. К. Ясинский, А. С. Кочетков // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. – 2011. – № S2. – С. 53–59.
12. *Отработка технологии опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti₂AlNb* / Н. А. Ночовная, С. В. Скворцова, Д. С. Анищук, Е. Б. Алексеев, П. В. Панин, О. З. Умарова // *Титан*. – 2013. – № 4. – С. 33–38.
13. *Определение технологических параметров деформации опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti₂AlNb* / Е. Б. Алексеев, Н. А. Ночовная, С. В. Скворцова, П. В. Панин, О. З. Умарова // *Титан*. – 2014. – № 2. – С. 36–41.
14. *Сплавы цветных металлов для авиационной техники* / В. М. Воздвиженский, А. А. Жуков, А. Д. Постнова, М. В. Воздвиженская; Под общ. ред. В. М. Воздвиженского. – Рыбинск: РГАТА, 2002. – 220 с.
15. *Влияние температуры на фазовый состав и структуру интерметаллидного сплава ВТИ-4* / С. В. Скворцова, О. З. Умарова, И. А. Грушин, Е. О. Агаркова, Д. С. Анищук // *Титан*. – 2015. – № 2. – С. 11–15.

Получено 16.06.2015