

УДК 669.295

*Е.Б. Алексеев¹, Н.А. Ночовная¹, А.В. Новак¹, П.В. Панин¹***ДЕФОРМИРУЕМЫЙ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫЙ ТИТАНОВЫЙ ОРТО-СПЛАВ, ЛЕГИРОВАННЫЙ ИТТРИЕМ.****Часть 2. Исследование влияния термической обработки на микроструктуру и механические свойства катаной плиты**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-37-45

Представлена микроструктура катаной в двухфазной ($\beta/B2+\alpha_2$)-области плиты (толщина 35 мм) из деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием. Проведены механические испытания образцов из катаной плиты на кратковременную и длительную прочность при 700°C. Изучено влияние термической обработки (температуры нагрева первой ступени) на структуру и механические свойства катаной плиты. Показано, что проведение термической обработки с температурой нагрева первой ступени 920°C обеспечивает максимальное значение относительного удлинения при комнатной температуре – $\delta=11,7\%$. Дальнейшее повышение температуры нагрева первой ступени приводит к снижению пластических свойств. Аналогичная зависимость механических свойств от режимов термической обработки наблюдается и при испытаниях на растяжение при 700°C.

Ключевые слова: интерметаллидный титановый сплав, орто-фаза Ti_2AlNb , редкоземельные элементы (РЗЭ), иттрий, микроструктура, термическая обработка, механические свойства.

*Е.В. Alexeev¹, N.A. Nochovnaya¹, A.V. Novak¹, P.V. Panin¹***WROUGHT INTERMETALLIC TITANIUM ORTHO ALLOY DOPED WITH YTTRIUM.****Part 2. Research on heat treatment effect on rolled slab microstructure and mechanical properties**

Microstructure has been shown for a 35 mm thickness plate (slab) from wrought intermetallic titanium ortho alloy doped with yttrium after rolling in a two-phase ($\beta/B2+\alpha_2$)-area. Mechanical tests of samples from the rolled plate have been carried out for short-term and long-term strength determination at a temperature of 700°C. The influence of heat treatment (in particular the 1st stage heating temperature) on microstructure and mechanical properties of the rolled plate has been investigated. It has been shown that heat treatment with the 1st stage temperature of 920°C provides the maximum value of room temperature elongation – $\delta=11,7\%$. Further increase in the 1st stage heating temperature leads to a decrease of plastic characteristics. A similar dependence of mechanical properties on heat treatment modes is also observed upon tensile tests at 700°C.

Keywords: intermetallic titanium alloy, ortho-phase Ti_2AlNb , rare-earth elements (REE), yttrium, microstructure, heat treatment, mechanical properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

В настоящее время одним из перспективных классов жаропрочных материалов, применяемых для авиакосмической техники, являются деформируемые интерметаллидные орто-сплавы. Основа данных сплавов – интерметаллидная орто-ромбическая фаза Ti_2AlNb (O-фаза) [1–5]. Сплавы данной группы обладают повышенной (по сравнению с традиционными жаропрочными титановыми сплавами) рабочей температурой до $700^{\circ}C$, высокими прочностными и жаропрочными свойствами. При этом хорошие (по сравнению с литейными интерметаллидными титановыми сплавами) технологические свойства позволяют изготавливать из них крупногабаритные полуфабрикаты. С учетом вышесказанного, а также принимая во внимание плотность интерметаллидных орто-сплавов (до $5,4 \text{ г/см}^3$), можно рассматривать возможность замены жаропрочных никелевых сплавов (с плотностью – до $8,55 \text{ г/см}^3$) при изготовлении деталей, работающих в диапазоне температур до $700^{\circ}C$, для новых перспективных авиационных двигателей. Применение жаропрочных орто-сплавов позволит обеспечить снижение массы деталей на 20–40%.

Микроструктура деформируемых орто-сплавов характеризуется тремя фазами: O (Ti_2AlNb), α_2 (Ti_3Al) и $\beta/B2$. Упорядоченные интерметаллидные O- и α_2 -фазы обладают крайне низкой пластичностью; β -фаза, присутствие которой обусловлено высоким содержанием β -стабилизаторов (в первую очередь, Nb), является пластичной матрицей. Микроструктура орто-сплавов может варьироваться в широком диапазоне в зависимости от способов деформационной и термической обработок. Для работы при высоких температурах важно сформировать термически стабильную однородную структуру: равноосную, пластинчатую или бимодальную. Уровень механических характеристик титановых орто-сплавов напрямую зависит от морфологии структуры. Изменяя температурно-временные параметры термической обработки (ТО), можно управлять уровнем пластичности, прочности и жаропрочности.

К настоящему времени ФГУП «ВИАМ» совместно с ПАО «Корпорация ВСПО-АВИСМА» опробованы технологические режимы изготовления крупногабаритных полуфабрикатов из интерметаллидных орто-сплавов ВТИ-4 и ВИТ1 [6–8], проводится набор статистических данных по результатам прочностных и эксплуатационных испытаний полуфабрикатов для оценки возможности применения этих сплавов в конструкции узлов ГТД.

Несмотря на практические достижения при изготовлении крупногабаритных полуфабрикатов из орто-сплавов ВТИ-4 и ВИТ1, намечены дальнейшие пути совершенствования данного класса материалов, в том числе путем разработки составов, легированных редкоземельными элементами (РЗЭ), активно применяемыми в литейных интерметаллидных титановых γ -сплавах [9–21]. В этом направлении во ФГУП «ВИАМ» выполнены опытные работы, показавшие хорошие результаты по повышению механических свойств изготовленных полуфабрикатов [21–25].

В данной работе продолжено исследование катаной плиты, представленное в первой части статьи, посвященной интерметаллидному титановому орто-сплаву с микродобавками иттрия [26]. Показана микроструктура катаной плиты в исходном состоянии и после проведения ТО по нескольким режимам. Изучено влияние температуры нагрева первой ступени ТО на структуру и механические свойства катаной плиты. Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 7.1. «Интерметаллидные сплавы на основе титана» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [27–30].

Материалы и методы

Исследования проводили на катаной плите из деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного редкоземельным элементом (РЗЭ) иттрием. Химический состав сплава представлен в таблице.

**Химический состав деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава,
легированного иттрием**

Содержание легирующих элементов, % (по массе)										
Al	Nb	V	Mo	Zr	Ta	W	Si	Y	Ti	
11,0	40,0	Σ=5,0					0,2	0,3	Основа	

Выплавку слитка исследуемого сплава осуществляли в вакуумно-дуговой печи VAR L200 фирмы ALD. Изготовленный слиток имел массу 30 кг и следующие размеры: диаметр 154 мм, высота 270 мм.

Деформационную обработку, включающую осадку слитка орто-сплава, легированного иттрием, и всестороннюю ковку со снижением температуры подогрева заготовки, проводили на гидравлическом прессе (усилием 1600 тс) со штампами, подогреваемыми до температуры 940–960°C. Изготовление катаной плиты толщиной 35 мм осуществляли на прокатном стане «Шмитц».

Для термической обработки заготовок из катаной плиты использовали муфельную лабораторную печь NaberTherm L(T) 15/12 и камерную печь с каменной изоляцией NaberTherm LH 60/14.

Исследование микроструктуры выполняли на оптическом металлографическом микроскопе Leica DM IRM и растровом электронном микроскопе JSM-6490LV.

Механические испытания на растяжение при температурах 20 и 700°C и длительную прочность при температуре 700°C (при заданном напряжении 260 МПа) образцов из катаной плиты проводили в условиях испытательного центра ФГУП «ВИАМ» на аттестованных и поверенных испытательных машинах.

Результаты и обсуждение

Представленные в данной статье результаты являются продолжением исследований деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием [26]. В первой части работы выполнено и установлено следующее.

1. В высотном направлении выплавленного слитка микроструктура по образующей поверхности представлена вытянутыми β-зернами и незначительными мелкодисперсными частицами α₂-фазы, при этом в центральной части наблюдается увеличение количества мелкодисперсных выделений α₂-фазы (длина – до 10 мкм), что обусловлено различной скоростью охлаждения центральной и образующих частей слитка, а следовательно, и скоростью протекания фазовых превращений.

2. В центральной части слитка интерметаллидного орто-сплава дисперсные частицы α₂-фазы предпочтительно выделяются в междендритных зонах, обогащенных легкоплавкими элементами, такими как алюминий.

3. Проведен дифференциальный термический анализ интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, с построением ДСК-кривых, характеризующих температуры фазовых превращений:

– при температуре 922°C на ДСК-кривой наблюдается минимум, отвечающий за растворение O-фазы при нагреве образца;

– при температуре 1068°C наблюдается второй минимум, соответствующий температуре растворения α₂-фазы и фазовому переходу из двухфазной (β/В2+α₂)-области в однофазную β/В2-область.

4. При температурах 850; 950 и 1050°C проведены испытания цилиндрических образцов на сжатие при скорости осадки 10⁻² с⁻¹. Для интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, показана зависимость снижения предела текучести при сжатии с повышением температуры: 740, 225 и 84 МПа соответственно.

5. Легирование интерметаллидных титановых орто-сплавов РЗЭ обеспечивает повышение сопротивления деформации и температуры прокатки.

Прокатку первой (экспериментальной) плиты на толщину 35 мм из деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, осуществляли при температуре двухфазной ($\beta/\beta_2+\alpha_2$)-области. Микроструктура в исходном состоянии после прокатки представлена на рис. 1.

Микроструктура катаной плиты представлена вытянутыми в направлении прокатки первичными β -зернами (рис. 1, а, б), внутри и по границам которых располагаются дисперсные выделения упорядоченной интерметаллидной α_2 -фазы; в структуре также наблюдаются частицы оксида иттрия Y_2O_3 (рис. 1, в, г).

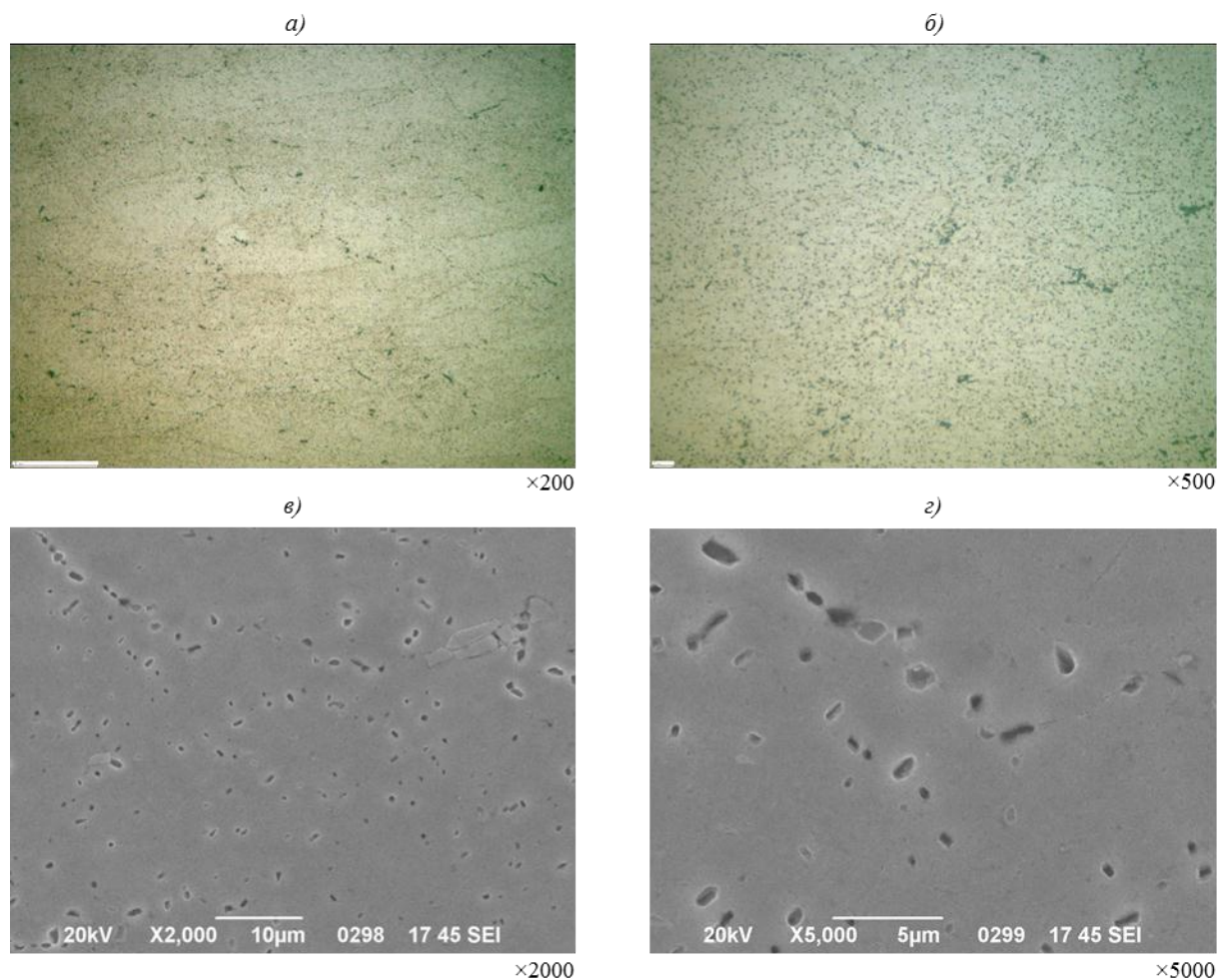


Рис. 1. Микроструктура первой (экспериментальной) катаной плиты толщиной 35 мм из деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, в исходном состоянии: а, б – оптическая микроскопия; в, г – РЭМ

Формирование основного комплекса механических свойств полуфабрикатов из деформируемых интерметаллидных титановых орто-сплавов обеспечивается проведением последующей ТО, которая, как правило, является двухступенчатой и состоит из закалки на воздухе и старения. В данной работе для исследования влияния ТО на механические свойства плиты из орто-сплава, легированного иттрием, выбрано пять технологических режимов, отличающихся друг от друга температурой нагрева первой ступени. Температуру нагрева повышали через каждые 30°C в диапазоне температур от 890 до

1010°C, при этом все остальные параметры (время выдержки, скорость нагрева и охлаждения) ТО оставались неизменными. Старение проводили в двухфазной (O+β/B2)-области с последующим охлаждением образцов с печью со скоростью 150°C/ч.

Как известно, одним из недостатков интерметаллидных сплавов являются невысокие пластические свойства при комнатной температуре. Поэтому в данной работе основное внимание обращено на исследование влияния режимов ТО на механические свойства при температуре 20°C. Результаты испытаний на растяжение при комнатной температуре образцов из катаной плиты орто-сплава, легированного иттрием, в исходном состоянии и после проведения термической обработки по выбранным режимам представлены на рис. 2. Как видно из полученных результатов механических испытаний (рис. 2), проведение ТО по всем выбранным режимам приводит к снижению кратковременной прочности с 1180 до 1030–1125 МПа и повышению относительного удлинения с 1,2 до 3,2–11,7%. Это объясняется как снятием остаточных напряжений, возникших в материале после деформационной обработки, так и формированием нового структурно-фазового состояния.

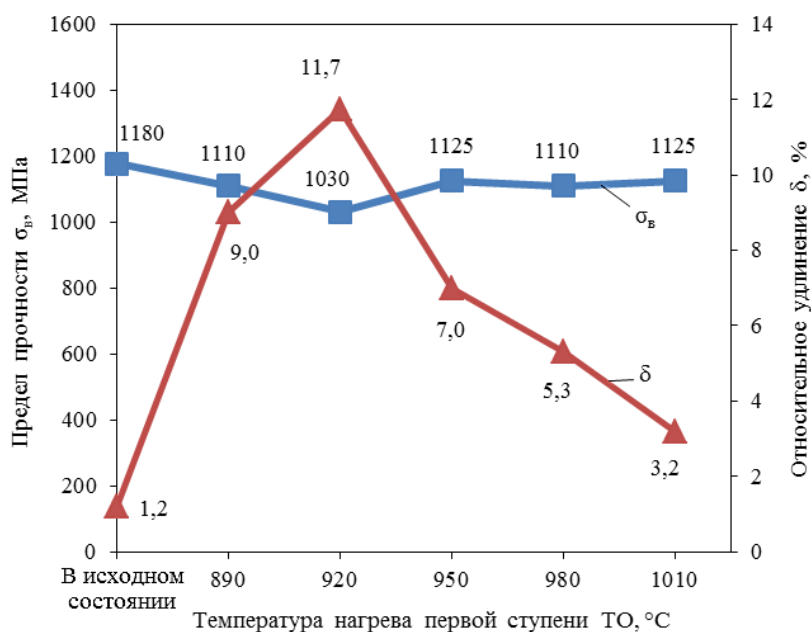


Рис. 2. Результаты испытаний (средние значения) на растяжение при 20°C образцов из катаной плиты из деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, в исходном состоянии после прокатки и после термической обработки (ТО)

Максимальное значение пластических свойств ($\delta^{20^\circ} = 11,7\%$) наблюдается при проведении термической обработки с температурой нагрева первой ступени 920°C, которая практически соответствует пику на ДСК-кривых, отвечающему за растворение O-фазы [26]. Дальнейшее повышение температуры нагрева первой ступени с 920 до 1010°C за счет изменения количества и морфологии интерметаллидной O-фазы приводит к постепенному снижению пластических свойств. Изменение микроструктуры в зависимости от температуры нагрева первой ступени ТО можно наблюдать на рис. 3.

Следует отметить, что поскольку параметры (температура нагрева и время выдержки) второй ступени ТО остаются постоянными для всех опробованных режимов, то фазовый состав после проведения старения при температуре двухфазной (O+β/B2)-области практически не изменяется. В матрице β-фазы наблюдаются пластинчатые частицы

О-фазы и глобулярные частицы α_2 -фазы. Полного превращения α_2 -фазы в О-фазу не происходит из-за недостаточной диффузионной подвижности атомов при данной температуре и времени выдержки.

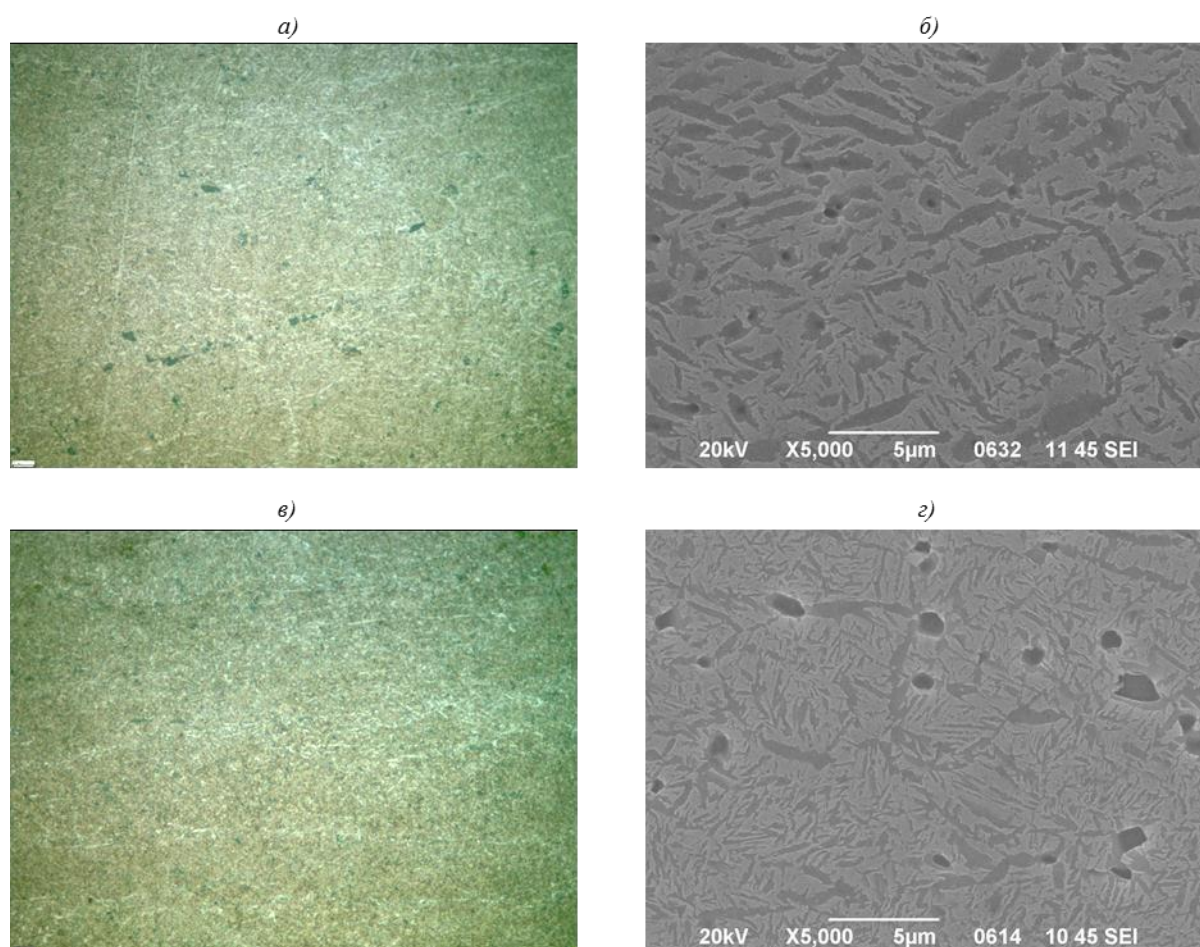


Рис. 3. Микроструктура образцов катаной плиты из деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, после проведения термической обработки при температуре нагрева первой ступени 920 (а, б) и 980°C (в, г) (а, в – оптическая микроскопия, $\times 500$; б, г – РЭМ, $\times 5000$)

Как видно из снимков микроструктуры, представленных на рис. 3, повышение температуры нагрева первой ступени с 920 до 980°C приводит к растворению крупных первичных пластин О-фазы и росту мелкодисперсных вторичных пластинчатых выделений О-фазы внутри β -зерен, что и приводит к снижению пластических свойств. При этом повышение температуры с 920 до 950°C обеспечивает увеличение кратковременной прочности с 1030 до 1125 МПа (рис. 2). Дальнейшее повышение температуры нагрева первой ступени $>950^\circ\text{C}$ нецелесообразно, так как прочностные свойства практически не изменяются, а значения пластических свойств снижаются значительно. В связи с этим механические испытания образцов из катаной плиты орто-сплава, легированного иттрием, на растяжение при повышенной температуре (700°C) проводили только после ТО в интервале температур нагрева первой ступени от 890 до 950°C. Значения механических свойств после испытаний на растяжение при 700°C представлены на рис. 4.

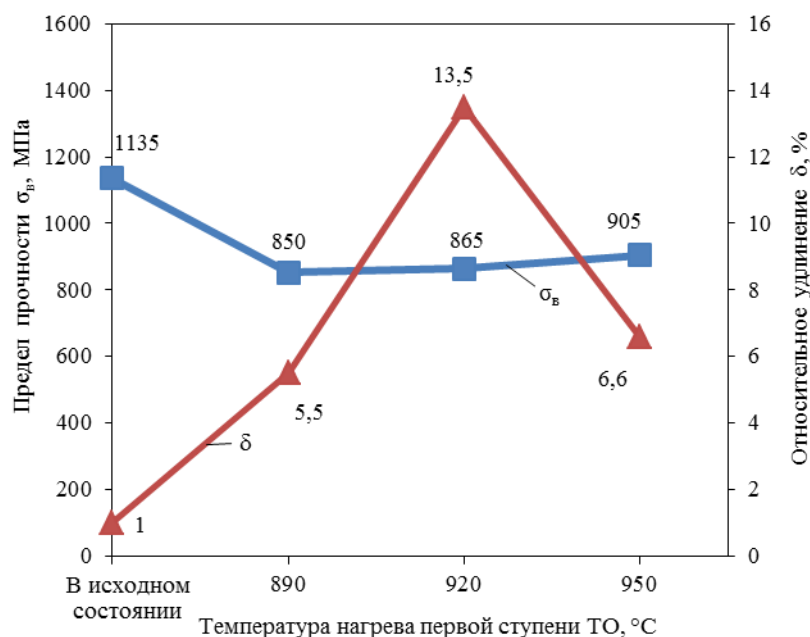


Рис. 4. Результаты испытаний (средние значения) на растяжение при 700°С образцов из катаной плиты из деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, в исходном состоянии после прокатки и после термической обработки (ТО)

Характер изменения кривых в зависимости от температуры нагрева первой ступени ТО после механических испытаний на растяжение при температуре 700°С практически совпадает с результатами испытаний при 20°С. Температура нагрева первой ступени 920°С также обеспечивает максимальное значение относительного удлинения ($\delta^{700^\circ} = 13,5\%$).

Дополнительно следует отметить высокий уровень прочностных свойств образцов из катаной плиты интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, при температуре испытания 700°С – предел кратковременной прочности после всех режимов термической обработки >850 МПа, что может свидетельствовать о хороших жаропрочных свойствах данного сплава.

Для подтверждения высказанного предположения проведены испытания на длительную прочность образцов из катаной плиты интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, при температуре испытания 700°С при заданном напряжении 260 МПа. Испытания на длительную прочность проводили после термической обработки образцов по двум режимам: с температурой нагрева первой ступени при 920 и 950°С (как отмечено ранее, дальнейшее повышение температуры первой ступени нецелесообразно, поскольку происходит заметное снижение пластических свойств). По результатам испытаний на длительную прочность установлено, что образец с температурой нагрева первой ступени 920°С простоял при напряжении 260 МПа 63 ч до разрушения, в то время как повышение температуры термической обработки до 950°С приводит к увеличению времени до разрушения почти в два раза – до 120 ч.

Заключения

1. Микроструктура изготовленной катаной плиты из деформируемого интерметаллидного титанового орто-сплава, легированного иттрием, представлена вытянутыми в направлении прокатки первичными β -зернами с дисперсными выделениями упорядоченной интерметаллидной α_2 -фазы, которая располагается внутри и по границам зерен.

2. Проведение опробованных режимов двухступенчатой ТО со старением в двухфазной ($O+\beta/V_2$)-области приводит к появлению пластинчатых частиц O -фазы. При этом выбранных в данной работе температуры и времени старения недостаточно для полного прохождения процесса превращения α_2 -фазы в O -фазу, что объясняется низкой диффузионной подвижностью атомов.

3. Показано, что повышение температуры нагрева первой ступени с 920 до 980°C приводит к растворению крупных первичных пластин O -фазы и росту мелкодисперсных вторичных пластинчатых выделений O -фазы внутри β -зерен, что отражается на изменении механических свойств.

4. Максимальное значение пластических свойств (11,7%) наблюдается при проведении ТО с температурой нагрева первой ступени 920°C, соответствующей пику на ДСК-кривых, отвечающему за растворение O -фазы. Дальнейшее повышение температуры нагрева первой ступени за счет изменения морфологии пластинчатых выделений O -фазы приводит к снижению пластических (до 3,2%) и увеличению прочностных свойств (с 1030 до 1125 МПа). При этом повышение температуры нагрева первой ступени >950°C нецелесообразно, так как значение прочности практически не изменяется, а пластичность резко снижается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
2. Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications / ed. by C. Leyens, M. Peters. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2003. 513 p.
3. Chen W., Li J.W., Xu L., Lu B. Development of Ti_2AlNb Alloys: Opportunities and Challenges // Advanced Materials and Processes. 2014. Vol. 172. P. 23–27.
4. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
5. Banerjee D., Gogia A.K., Nandy T.K., Joshi V.A. A new ordered orthorhombic phase in a Ti_3AlNb alloy // Acta Metallurgica. 1988. Vol. 36. P. 871–882.
6. Сплав на основе титана и изделие, выполненное из него: пат. 2210612 Рос. Федерация. №2001125968/02; заявл. 24.09.01; опубл. 20.08.03.
7. Интерметаллидный сплав на основе титана: пат. 2405849 Рос. Федерация. №2009139791/02; заявл. 28.10.09; опубл. 10.12.10, Бюл. №34. 5 с.
8. Новак А.В., Алексеев Е.Б., Иванов В.И., Дзунович Д.А. Изучение влияния параметров закалки на структуру и твердость интерметаллидного титанового орто-сплава ВТИ-4 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №2 (62). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-5-5.
9. Zhang S.Z. et al. Phase transformation and microstructure evolution of differently processed $Ti-45Al-9Nb-Y$ alloy // Intermetallics. 2012. Vol. 31. P. 208–216.
10. Liu Z.G., Chai L.H., Chen Y.Y. Microstructure evolution in rapidly solidified Y added $TiAl$ ribbons // Intermetallics. 2011. Vol. 19. Is. 2. P. 160–164.
11. Zhao L.L., Li G.Y., Zhang L.Q. Influence of Y addition on the long time oxidation behaviors of high Nb containing $TiAl$ alloys at 900°C // Intermetallics. 2010. Vol. 18. Is. 8. P. 1586–1596.
12. Chen Y., Si Y., Kong F. Effects of yttrium on microstructures and properties of $Ti-17Al-27Nb$ alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006. Vol. 16. Is. 2. P. 316–320.
13. Li B., Kong F., Chen Y. Effect of Yttrium Addition on Microstructures and Room Temperature Tensile Properties of $Ti-47Al$ Alloy // Journal of Rare Earths. 2006. Vol. 24. Is. 3. P. 352–356.
14. Chen Y., Li B., Kong F. Microstructural refinement and mechanical properties of Y-bearing $TiAl$ alloys // Journal of Alloys and Compounds. 2008. Vol. 457. Is. 1–2. P. 265–269.

15. Chen Y., Li B., Kong F. Effects of minor yttrium addition on hot deformability of lamellar Ti–45Al–5Nb alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2007. Vol. 17. Is. 1. P. 58–63.
16. Si Y., Chen Y., Liu Z., Kong F. Influence of yttrium on microstructure and properties of Ti–23Al–25Nb alloy after heat treatment // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006. Vol. 16. Supplement 2. P. 849–853.
17. Chen Y., Kong F., Han J., Chen Z., Tian J. Influence of yttrium on microstructure, mechanical properties and deformability of Ti–43Al–9V alloy // Intermetallics. Vol. 13. Is. 3–4. 2005. P. 263–266.
18. Chang X., Si J., Gao F., Jing Y., Zhang J. Effect of Gd Addition on Heat Treatment Microstructure of Wrought TiAl // Journal of Iron and Steel Research International. 2007. Vol. 14. Is. 5. Supplement 1. P. 26–29.
19. Lia W., Inkson B., Horitac Z., Xia K. Microstructure observations in rare earth element Gd-modified Ti–44 at% Al // Intermetallics. 2000. Vol. 8. Is. 5–6. P. 519–523.
20. Xia K., Li W., Liu C. Effects of addition of rare earth element Gd on the lamellar grain sizes of a binary Ti–44Al alloy // Scripta Materialia. Vol. 41. Is. 1. 1999. P. 67–73.
21. Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. Gamma titanium aluminide alloys: science and technology. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011. 745 p.
22. Ширяев А.А., Анташев В.Г. Особенности разработки высокопрочного самозакаляющегося высокотехнологичного псевдо-β-титанового сплава // Авиационные материалы и технологии. 2014. №4. С. 23–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-4-23-30.
23. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Панин П.В., Новак А.В. Исследование структуры и механических свойств деформируемого интерметаллидного титанового сплава ВИТ5, легированного гадолинием // Титан. 2017. №2. С. 21–29.
24. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Новак А.В. Исследование структуры и свойств жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана с микродобавками гадолиния // Материаловедение. 2017. №3. С. 3–10.
25. Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Новак А.В. Закономерности формирования структурно-фазового состояния сплавов на основе орто- и гамма-алюминидов титана в процессе термомеханической обработки // Вестник РФФИ. 2015. №1 (85). С. 18–26.
26. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Новак А.В., Панин П.В. Деформируемый интерметаллидный титановый орто-сплав, легированный иттрием. Часть 1. Исследование микроструктуры слитка и построение реологических кривых // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №6 (66). С. 12–21. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-12-21.
27. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
28. Антипов В.В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 157–167.
29. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // Металлург. 2013. №12. С. 4–8.
30. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.