

УДК 669.017.165

*М.С. Оглодков¹, В.А. Дуюнова¹, Н.А. Ночовная¹, В.И. Иванов¹, Л.Ю. Авилочев¹***ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО
СПЛАВА ВИТ1 ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-12-3-13

Интерметаллидный сплав ВИТ1 является перспективным материалом для деталей газотурбинных двигателей, работающих до температуры 700 °С. В работе исследована технология горячей обработки давлением литой заготовки на плиту толщиной 25 мм. Технология включала три всесторонниековки литой заготовки, ковку вытяжской промежуточной заготовки и ее последующую прокатку на конечный размер. Изучено влияние термической обработки на макро- и микроструктуру плит. Выбранная схема горячей деформации и режим термической обработки обеспечивают в плитах повышенный уровень механических свойств.

Ключевые слова: интерметаллидный сплав, обработка давлением, термическая обработка, структура, механические свойства.

*M.S. Oglodkov¹, V.A. Dyuunova¹, N.A. Nochovnaya¹, V.I. Ivanov¹, L.Yu. Avilochev¹***FEATURES OF THE TECHNOLOGY MANUFACTURING
OF DEFORMED BLANKS FROM INTERMETALLIC ALLOYS VIT1
FOR PARTS OF THE GAS TURBINE ENGINE**

Intermetallic alloy based on a Ti_2AlNb compound are the most promising high-temperature materials for gas turbine engines operating up to a temperature of 700 degrees Celsius. In this paper, the technology of hot pressure treatment of a cast billet on a plate with a thickness of 25 mm is studied. The technology included three comprehensive forging of the ingot billet, forging by drawing the intermediate billet and its subsequent rolling to the final size. The influence of heat treatment on the macro and microstructure of plates is studied. The chosen scheme of hot deformation and the mode of heat treatment provides an increased level of mechanical properties in the plates.

Keywords: intermetallic alloy, pressure treatment, heat treatment, structure, mechanical properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute»]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Применение жаропрочных титановых сплавов в конструкциях газотурбинных двигателей до температуры 600 °С способствовало снижению массы деталей и узлов, повышению параметров двигателей и их эксплуатационных характеристик. Использование титановых сплавов при больших температурах ограничено, что связано со снижением жаропрочности (главным образом сопротивления ползучести), термической стабильности и повышенным окислением [1].

Для решения этих проблем было предложено использовать материалы на основе алюминидов титана. Одним из представителей этого класса материалов являлся интерметаллид Ti_3Al (α_2 -фаза), который имел повышенные удельные жаропрочные характеристики (длительную прочность, сопротивление ползучести), стойкость к окислению и горению [2–4].

Однако интерметаллид Ti_3Al обладал существенными недостатками, связанными с низкой пластичностью при комнатной температуре и низкой технологичностью при изготовлении деформированных полуфабрикатов [5].

Проведенные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ исследования показали, что низкие свойства интерметаллида Ti_3Al можно повысить, используя дополнительное легирование, измельчение структуры с помощью операций горячей обработки давлением и термической обработки [6].

Значительное легирование ниобием интерметаллида Ti_3Al привело к образованию интерметаллида Ti_2AlNb (так называемая орто-фаза), имеющего состав $Ti-14Al-42Nb$ (% (по массе)). Этот интерметаллид обладает повышенной температурой плавления, низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), лучшими жаропрочными свойствами и повышенной пластичностью при комнатной температуре по сравнению с последними разработками супер- α_2 -сплавов [5].

Анализ научно-технической информации в области разработки сплавов на основе интерметаллида Ti_2AlNb показал, что характеристики удельной прочности и жаропрочности этого соединения могут быть повышены путем:

- легирования сплавов тугоплавкими элементами и активными неметаллами;
- использования операций горячей деформации для измельчения структуры;
- термической обработки для стабилизации фазового состава и получения оптимальных структурных параметров.

Для этих целей использовано экономное легирование орто-фазы элементами – Zr, Mo, Ta, W (в сумме <6 % (по массе)), что привело к повышению прочностных свойств, термической стабильности и стойкости к окислению. Легирование элементами Si и C (в сумме <0,5 % (по массе)) вызывало дисперсионное упрочнение за счет образования карбосилицидных фаз, повышающих жаропрочные характеристики. Использование этих подходов привело к разработке жаропрочного интерметаллидного орто-сплава марки ВИТ1 [6].

Несмотря на значительные преимущества сплава ВИТ1, ему свойственны некоторые недостатки, связанные с повышенными плотностью и стоимостью, однако эти недостатки не критичны, поскольку они свойственны всему классу разработанных орто-сплавов.

Первоначально орто-сплавы разрабатывались в качестве матричной основы для композиционных материалов, поскольку их повышенная технологичность и прочность обеспечивали получение тонколистовых полуфабрикатов.

При создании интерметаллидного композиционного материала в качестве матрицы использовался тонколистовой орто-сплав состава $Ti-22Al-23Nb$ (% (атомн.)), который упрочнялся высокопрочными волокнами карбида кремния (β -SiC) диаметром 140 мкм в количестве 35–40 % (объемн.). Такой материал показал уникальные механические свойства: плотность $d \approx 4,4$ г/см³, $\sigma_B^{20^\circ} \approx 2000$ МПа, $\sigma_{-1}^{20^\circ} \approx 900$ МПа, $\sigma_B^{650^\circ} \approx 1800$ МПа и $\sigma_{100}^{650^\circ} > 1100$ МПа. Использование в конструкциях интерметаллидных композиционных материалов позволит увеличить их жесткость на 30 %, повысить прочность на 40 % и снизить массу на 45 %, что приведет к увеличению характеристик надежности и ресурса конструкции [7].

В настоящее время достигнутый уровень механических свойств орто-сплавов позволяет использовать их в монолитном варианте для деталей с рабочей температурой на 100–150 °С больше, чем для классических титановых сплавов, что может привести к снижению массы деталей на 20 % (по сравнению с жаропрочными сталями), обеспечить стойкость к окислению и пожаробезопасность.

Данная работа посвящена разработке технологии изготовления из интерметаллидного сплава ВИТ1 деформированных заготовок в виде плит и исследованию влияния макро- и микроструктуры на механические свойства плит применительно к деталям газотурбинного двигателя.

Материалы и методы

В работе использовались слитки из сплава ВИТ1 размером $\varnothing 330 \times 150$ мм, которые изготавливали по технологии, принятой в производстве серийных титановых сплавов. Слитки разрезали по диаметру на восемь частей и использовали в дальнейших исследованиях.

Определение химического состава сплавов проводили на установке атомно-абсорбционного анализа (Varian 240FS) и атомно-эмиссионном спектрометре с источником связанной плазмы (Varian 730 ES). Полученные результаты определения химического состава сплавов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав слитков из сплава ВИТ1

Элементы	Химический состав, % (по массе), слитка	
	1 (плавка 536)	2 (плавка 540)
Al	10,9	10,8
Nb	39,8	39,1
Zr + Ta + Mo + W	5,116	5,18
Si + C	0,2	0,21
Fe	0,04	0,04
O + N	0,08	0,08
Ti	Основа	

Для изготовления деформированных полуфабрикатов слитки из сплава ВИТ1 разрезали на четыре сектора по диаметру для получения 8 полукруглых секторных заготовок размером 162×300 мм для последующей горячей обработки давлением.

Термическую обработку деформированных заготовок осуществляли в лабораторной печи Naber Term LT15/12 (701).

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51. Шлифы для исследований изготавливали по стандартным методикам, включающим механическую и электролитическую полировку. Травление микрошлифов для выявления микроструктуры осуществляли в соответствии со стандартной процедурой.

Рентгеновский фазовый анализ образцов из плит проводили на дифрактометре ДРОН-3М, а для электронно-микроскопического исследования использовали электронный просвечивающий микроскоп JTM-200-СХ.

Количественный анализ микроструктуры образцов плит в исходном состоянии и после термической обработки осуществляли на металлографическом комплексе фирмы Leica с цифровой камерой VEC-335 и компьютерной программой Image Expert Pro 3×.

Испытания механических свойств заготовок плит проводили при растяжении на образцах диаметром 5 мм и расчетной длиной 25 мм на сервогидравлической машине MTS (США) при скорости нагружения 2,5 мм/мин (ГОСТ 1497–84). Испытания на длительную прочность за 100 и 500 ч при температурах 650 и 700 °С проводили в воздушной среде с влажностью 56–60 % на машинах ZDM-93 (ГОСТ 10145–81).

Результаты и обсуждение

По сравнению с классическими титановыми сплавами, горячая деформация орто-сплавов затруднена, что связано с сильной зависимостью прочности литой структуры от скорости нагружения, повышенной теплопроводностью материала и значительным окислением при температурах деформации. Эти особенности сплавов приводят к образованию хрупких газонасыщенных слоев и разрушению материала [8–11]. Устранение этих факторов достигается изотермической ковкой при температурах больше температуры полного полиморфного превращения ($T_{п.п}$) сплава, использованием низких скоростей деформирования и низких допустимых деформаций [12, 13].

При разработке технологии горячей деформации слитков использовали изотермический пресс П2642 с усилием 16 МН. Горячая деформация слитков включала следующие этапы: три предварительные всесторонниековки литых заготовок со сменой оси, ковку промежуточной заготовки под прокатку и изготовление катаных заготовок (плит).

Перед ковкой механически обработанные слитки из сплава ВИТ1 покрывали смесью эмалей ЭВТ-24 и ЭВТ-100 и в дальнейшем использовали для проведения операций горячей деформации.

Ковка литых заготовок

Первая всесторонняя ковка. Литые полукруглые секторные заготовки нагревали до температуры $T_{п.п} + 60$ °С и ковали на заготовку в виде круга размером $\varnothing 160 \times L$ (где L – длина заготовки, мм), а затем осаживали на высоту 245 мм, подогревали до температуры $T_{п.п} + 60$ °С, проводили смену оси и осаживали на высоту 170 мм с последующей обкаткой на заготовку в виде круга диаметром 160 мм.

Вторая всесторонняя ковка. Заготовки нагревали до температуры $T_{п.п} + 60$ °С и осаживали на высоту 160 мм, подогревали при температуре $T_{п.п} + 60$ °С, проводили смену оси и ковали на заготовку в виде квадрата размером 150×150 мм с последующей обкаткой на заготовку в виде круга диаметром 145 мм.

Третья всесторонняя ковка. Заготовки нагревали до температуры $T_{п.п} + 60$ °С, осаживали на высоту 160 мм, подогревали при температуре $T_{п.п} + 0$ °С, проводили смену оси и ковали на квадрат размером 150×150 мм с последующей обкаткой на заготовку в виде круга диаметром 145 мм.

Изготовление промежуточной заготовки

После всестороннейковки заготовки нагревали до температуры $T_{п.п.} + 20$ °С и осаживали на высоту 150 мм, после подогрева при температуре $T_{п.п} + 20$ °С проводили смену оси и осаживали на высоту 145 мм с последующей обкаткой на заготовку в виде круга диаметром 140 мм, после чего заготовки охлаждали на воздухе. Образовавшуюся на поверхности заготовки окалину удаляли с помощью пескоструйной обработки и обточки до получения чистой поверхности.

Обработанную заготовку размером $\varnothing 135 \times L$ мм нагревали до температуры $T_{п.п} - 20$ °С и ковали с помощью вытяжки на заготовку в виде круга размером $\varnothing 110 \times L$ мм с промежуточным подогревом до первоначальной температуры. Затем заготовку в виде круга размером $\varnothing 110 \times L$ мм нагревали до температуры $T_{п.п} - 20$ °С и ковали на заготовку в виде плиты толщиной 95 мм и после подогрева при температуре $T_{п.п} - 20$ °С проводили ковку на заготовку в виде плиты толщиной 75 мм, а затем после подогрева при температуре $T_{п.п} - 20$ °С ковали на заготовку в виде плиты толщиной 52 мм, после чего кованые заготовки охлаждали на воздухе.

Изготовление катаных плит

Кованые заготовки толщиной 52 ± 1 мм разрезали на темплеты размером $52 \times 190 \times 380$ мм (толщина/ширина/длина) и подвергали обстругиванию по всем поверхностям и снятию фаски со всех углов. Механически обработанные заготовки размером $(44 \pm 1) \times 180 \times 180$ мм (толщина/ширина/длина) использовали в дальнейшем для получения конечного полуфабриката.

Предварительные эксперименты показали, что при прокатке при температурах менее $T_{п.п} - 120$ °С не удается получить качественную плиту из-за образования сетки поверхностных трещин за счет подхлаживания поверхности заготовок. Поэтому прокатку проводили при температурах нагрева $T_{п.п} - 70$ °С и деформации ~ 25 % за каждый проход с промежуточным подогревом. Такой режим прокатки заготовок позволил получить плиты размером $(25 \pm 1) \times 200 \times 350$ мм (толщина/ширина/длина) без поверхностных дефектов. В дальнейшем эти заготовки использовали для исследования фазового состава, макро- и микроструктуры и механических свойств.

После горячей деформации из плит вырезали образцы размером $5 \times 5 \times 15$ мм и после подготовки поверхности проводили рентгеновский фазовый анализ и электронно-микроскопические исследования, в результате чего идентифицированы фазы и определен фазовый состав плит из сплава ВИТ1: >93 % (объемн.) орто-фазы + <7 % (объемн.) β_2 -фаза + α_2 -фаза + следы карбосилицидов.

Исследование показало, что орто-фаза имеет тетрагональную решетку, β_2 -фаза – объемноцентрированную кубическую решетку, а α_2 -фаза – гексагональную решетку. Кроме того, отмечались в небольшом количестве карбосилицидные соединения. Определить количество α_2 -фазы не представлялось возможным из-за отсутствия методик точного определения рентгеновским методом количества фаз <5 % (объемн.).

Исследование макроструктуры плит после горячей деформации проводили на образцах, вырезанных в продольном направлении, а микроструктуры – в поперечном направлении. Шлифы для исследований изготавливали по стандартным методикам, включающим механическую обработку, электролитическую полировку и травление. Типичные макро- и микроструктуры плит представлены на рис. 1 и 2 соответственно.



Рис. 1. Макроструктура ($\times 1$) плиты из сплава ВИТ1 после горячей деформации в продольном направлении



Рис. 2. Микроструктура ($\times 500$) плиты из сплава ВИТ1 после горячей деформации

Исследование показало, что в исходном состоянии заготовки плит имеют матовую макроструктуру с заметной ориентировкой вдоль направления деформации, а микроструктура представлена беззернистой структурой 1–2 типа и микроструктурой 3 балла шкалы микроструктур со сферической орто-фазой размером $\sim 1,3$ мкм, а также пластинчатой формы длиной 4,9 мкм и толщиной 2,34 мкм. Такая структура характерна для заготовок с высокой степенью деформации при пониженных температурах.

Геометрические параметры микроструктуры образцов из плит в исходном состоянии следующие:

Геометрические параметры β -зерен

Балл по зерну (ГОСТ 5639–82)	1–2
Средняя длина зерна L_{cp} , мкм	$575 \pm 24,5$
Средняя ширина зерна H_{cp} , мкм	$125 \pm 3,8$
Вытянутость L_{cp}/H_{cp}	4,6
Параметр сложности формы	$7,4 \pm 0,1$

Геометрические размеры дисперсной и игольчатой орто-фазы внутри β -зерен

Средняя длина частицы L_{cp} , мкм	$1,52 \pm 0,02$
Средняя толщина частицы H_{cp} , мкм	$1,21 \pm 0,01$
Вытянутость L_{cp}/H_{cp}	1,25
Длина игл L , мкм	4,9
Толщина игл H , мкм	2,34
Приведенный диаметр иглы $D_{пр}$, мкм	$3,8 \pm 0,02$
Параметр сложности формы	4,6

Геометрические размеры α_2 -фазы на границе β -зерна

Средняя толщина частиц H_{cp} , мкм	$2,88 \pm 0,03$
Минимальная толщина частиц H_{min} , мкм	1,2
Максимальная толщина частиц H_{max} , мкм	6,41
Средняя длина частиц H_{cp} , мкм	$5,12 \pm 0,12$
Максимальная длина частиц L_{max} , мкм	15,4
Вытянутость L_{max}/H_{cp}	3,0

В ранее проведенных работах [5, 14, 15] показано, что для получения требуемых механических свойств в деформированных полуфабрикатах из интерметаллидных титановых сплавов необходимо устранить наклеп и текстуру, сформировать оптимальную микроструктуру, что достигается термической обработкой. В результате этих исследований установлено, что оптимальным режимом термической обработки для ортосплавов являются кратковременный нагрев в $\beta + \alpha_2$ -области для получения определенных размеров первичных микрозерен при температуре $T_{п.п} - 120$ °С, охлаждение с регламентированной скоростью для получения тонкопластинчатых выделений первичной орто-фазы и старение в орто + β_2 -области при температуре $T_{п.п} - 320$ °С в течение продолжительного времени и последующего охлаждения заготовок на воздухе до комнатной температуры.

В термически обработанных образцах плит фазовый состав изменился до 68–70 % (объемн.) орто-фазы + 31–29 % (объемн.) β_2 -фазы + α_2 -фаза + следы карбосилицидов.

Типичные макро- и микроструктура заготовок из плит после термической обработки представлены на рис. 3 и 4. Заготовки плит имеют рекристаллизованную макроструктуру 4 балла шкалы макроструктур. Макроструктура сохранила преимущественную ориентировку, совпадающую с направлением продольной прокатки.

Микроструктура образцов плит после термической обработки представлена рекристаллизованной структурой 4 типа (рис. 4) с микрозерном размером 155/85 мкм (длина/толщина), выделениями орто-фазы в виде частиц 1,4–1,8 мкм и пластин 7,5/4 мкм (длина/толщина), а также α_2 -фазы в виде пластин 5,2/2,9 мкм (длина/толщина).

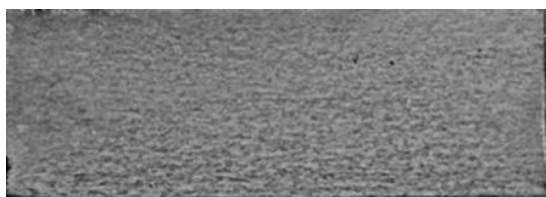


Рис. 3. Макроструктура ($\times 1$) плит из сплава ВИТ1 после термической обработки



Рис. 4. Микроструктура ($\times 600$) плит из сплава ВИТ1 после термической обработки

Геометрические параметры микроструктуры плит из сплава ВИТ1 после термической обработки следующие:

Геометрические параметры β -зерен

Балл по зерну (ГОСТ 5639–82)	3–4
Средняя длина зерна L_{cp} , мкм	155,7 \pm 7,2
Средняя ширина зерна H_{cp} , мкм	85 \pm 5
Вытянутость L_{cp}/H_{cp}	1,8
Параметр сложности формы	6,2

Геометрические размеры дисперсной и игольчатой орто-фазы внутри β -зерен

Средняя длина частицы L_{cp} , мкм	1,8 \pm 0,02
Средняя толщина частицы H_{cp} , мкм	1,4 \pm 0,02
Вытянутость L_{cp}/H_{cp}	1,28 \pm 0,01
Длина игл L , мкм	7,5
Толщина игл H , мкм	4,02
Вытянутость игл L_{cp}/H_{cp}	1,86
Параметр сложности формы	4,5

Геометрические размеры α_2 -фазы на границе β -зерна

Средняя толщина частиц H_{cp} , мкм	2,9 \pm 0,07
Средняя длина частиц L_{cp} , мкм	5,2 \pm 0,2
Вытянутость L_{cp}/H_{cp}	1,79
Максимальная толщина частиц H_{max} , мкм	6,4
Максимальная длина частиц L_{max} , мкм	21,3
Вытянутость частиц L_{max}/H_{max}	3,3

Образцы после термической обработки имели микроструктуру с размерами зерен – длиной $155 \pm 7,2$ мкм, шириной 85 мкм и вытянутостью 1,8. Выделения орто-фазы внутри зерна имели почти сферическую форму шириной 1,4 мкм и длиной 1,8 мкм, а также пластинчатую форму длиной до 7,5 мкм и шириной 4,02 мкм с коэффициентом сложности формы $\sim 4,5$. Отмечено также присутствие игольчатых частиц этой фазы длиной до 21,3 мкм с минимальной толщиной 1,3 мкм.

Из термически обработанных заготовок изготавливали образцы для испытаний механических свойств: предела прочности (σ_B), предела текучести ($\sigma_{0,2}$), относительного удлинения (δ) и относительного сужения (ψ) при температурах 20; 650 и 700 °С, а также длительной прочности за 100 и 500 ч при температурах 650 и 700 °С. Результаты этих испытаний при температурах 20; 650 и 700 °С представлены в табл. 2–4.

Таблица 2

**Кратковременная прочность плит при температуре испытания 20 °С
после термической обработки**

Условный номер образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1-1	1110	1280	8,9	12,3
1-2	1127	1225	9,7	14,5
1-3	1121	1221	8,6	13,1
9-1	1132	1250	8,5	13,2
9-2	1131	1257	9,6	14,1
9-3	1140	1260	10,1	14,5

Таблица 3

**Кратковременная прочность плит при температуре испытания 650 °С
после термической обработки**

Условный номер образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1-4	894	1035	14,2	16,2
1-5	880	1020	13,1	17,1
1-6	895	1041	14,1	17,9
9-4	894	1030	13,8	18,1
9-5	880	1043	14,1	17,8
9-6	891	1038	14,9	18,2

Таблица 4

**Кратковременная прочность плит при температуре испытания 700 °С
после термической обработки**

Условный номер образца	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1-7	769	835	15,2	17,2
1-8	780	842	17,1	17,1
1-9	795	841	17,1	18,9
9-7	769	843	18,0	18,1
9-8	759	821	18,2	17,6
9-9	765	824	17,8	17,8

Термически обработанные плиты из сплава ВИТ1 обладали следующими прочностными и пластическими свойствами:

- при температуре 20 °С – $\sigma_B > 1221$ МПа, $\sigma_{0,2} > 1110$ МПа, $\delta > 8,6$ %, $\psi > 12,3$ %;
- при температуре 650 °С – $\sigma_B > 1020$ МПа, $\sigma_{0,2} > 880$ МПа, $\delta > 13,8$ %, $\psi > 16,2$ %;
- при температуре 700 °С – $\sigma_B > 821$ МПа, $\sigma_{0,2} > 759$ МПа, $\delta > 15,2$ %, $\psi > 17,1$ %.

Результаты испытаний на длительную прочность за 100 и 500 ч при температурах 650 и 700 °С представлены в табл. 5 и 6.

Таблица 5

Длительная прочность плит за 100 ч после термической обработки

Условный номер образца	Температура испытания, °С	Напряжения σ , МПа	Время до разрушения τ , ч
1-4	650	452	105
1-5		465	99
1-6		542	110
9-4		460	108
9-5		462	110
9-6		456	121
8-17		490	60
8-18		450	105
8-19		450	125
8-20		450	140
1-7		700	352
1-8	365		80
1-9	352		106
9-7	356		109
9-8	328		134
9-9	342		112

Таблица 6

Длительная прочность плит за 500 ч после термической обработки

Условный номер образца	Температура испытания, °С	Напряжения σ , МПа	Время до разрушения τ , ч
8-41	650	327	460
8-42		317	501
8-43		307	505
8-44		307	500
8-45	700	73	491
8-46		68	501
8-47		68	506

Длительная прочность плит из сплава ВИТ1 после термообработки составила:

- при температуре 650 °С – $\sigma_{100}^{650^\circ} = 450$ МПа, $\sigma_{500}^{650^\circ} = 300$ МПа;
- при температуре 700 °С – $\sigma_{100}^{700^\circ} = 350$ МПа, $\sigma_{500}^{700^\circ} = 68$ МПа.

Полученные результаты механических испытаний при комнатной и повышенной температурах плит из сплава ВИТ1 показали его преимущества по сравнению с жаропрочным титановым сплавом ВТ41 (табл. 7).

Видно, что по удельной прочности (σ_b/d) при температуре 20 °С сплав ВТ41 и сплав ВИТ1 имеют приблизительно одинаковые значения: 24,0 и 23,5 км (усл. ед.). Однако при температуре 600 °С удельная длительная прочность за 100 ч сплава ВИТ1 больше, чем у сплава ВТ41, на ~25 %, а при температуре 650 °С сплав ВИТ1 по этому параметру превосходит сплав ВТ41 в 1,8 раза. Обладая такими жаропрочными свойствами, интерметаллидный титановый сплав ВИТ1 является перспективным материалом для деталей газотурбинных двигателей, поскольку позволит расширить диапазон рабочих температур титановых деталей на 100–150 °С и снизить массу деталей на 20 % при замене деталей из жаропрочных сталей.

Сравнительные свойства интерметаллидного сплава ВИТ1 и жаропрочного титанового сплава ВТ41

Свойства	Значения свойств для сплава	
	интерметаллидного ВИТ1	титанового ВТ41
При температуре испытания 20 °С		
Плотность d , кг/м ³	5300	4580
σ_B , МПа	1248	1100
σ_B/d , км (усл. ед.)	23,5	24,0
При температуре испытания 600 °С		
σ_B , МПа	1040	720
σ_{100} , МПа	500	335
σ_{100}/d , км (усл. ед.)	9,4	7,3
При температуре испытания 650 °С		
σ_B , МПа	1020	680
σ_{100} , МПа	450	215
σ_{100}/d , км (усл. ед.)	8,49	4,69

Заключения

Опробована технология получения из интерметаллидного сплава ВИТ1 деформированного полуфабриката – плиты, которая включала: три предварительные всесторонниековки со сменой осей литых заготовок при температуре $T_{п.п} + 60$ °С, ковку промежуточной заготовки под прокатку при температуре $T_{п.п} + 30$ °С и прокатку кованных заготовок на плиту при температуре $T_{п.п} - 70$ °С.

После горячей деформации заготовки плиты имели фазовый состав: >93 % (объемн.) орто-фазы + <7 % (объемн.) β_2 -фазы + α_2 -фаза + следы карбосилицидов. Макроструктура плит соответствовала 1–2 типам и содержала сферические частицы орто-фазы размером ~1,4 мкм и пластинчатые частицы толщиной 2,54 мкм и длиной 5,5 мкм. На границах β -зерен располагались частицы α_2 -фазы толщиной 2,98 мкм и длиной 4,95 мкм.

Заготовки плит подвергали термической обработке по режиму: нагрев до температуры $T_{п.п} - 70$ °С с кратковременной выдержкой, охлаждение до температуры $T_{п.п} - 320$ °С с длительной выдержкой, далее охлаждение на воздухе. Такая термическая обработка плит изменила фазовый состав заготовок на следующий: 68–70 % (объемн.) орто-фазы + 31–29 % (объемн.) β_2 -фазы + α_2 -фаза + следы карбосилицидов. Макроструктура плит имела рекристаллизованную структуру 4 балла с сохранением направления прокатки. Микроструктура заготовок плит соответствовала 4 типу. Микроструктура имело вытянутую форму с размерами 155/85 мкм (длина/толщина) и состояло из орто-фазы в виде частиц почти сферической формы 1,4–1,8 мкм и пластин 7,5×4,02 мкм (длина/толщина), а также α_2 -фазы в виде пластин 5,2/2,9 мкм (длина/толщина) и дисперсных частиц карбосилицидов.

Термически обработанные заготовки плит имели следующие механические свойства:

- при температуре 20 °С – $\sigma_B > 1221$ МПа, $\sigma_{0,2} > 1110$ МПа, $\delta > 8,5$ %, $\psi > 12,3$ %;
- при температуре 650 °С – $\sigma_B > 1020$ МПа, $\sigma_{0,2} > 880$ МПа, $\delta > 13,1$ %, $\psi > 16,2$ %, $\sigma_{100}^{650^\circ} = 450$ МПа и $\sigma_{500}^{650^\circ} = 300$ МПа;
- при температуре 700 °С – $\sigma_B > 821$ МПа, $\sigma_{0,2} > 759$ МПа, $\delta > 15,2$ %, $\psi > 17,2$ %, $\sigma_{100}^{700^\circ} = 300$ МПа и $\sigma_{500}^{700^\circ} = 68$ МПа.

Опробованная технология получения деформированного полуфабриката – плиты размером 25×200×350 мм из интерметаллидного сплава ВИТ1 – может быть использована в опытно-промышленном производстве для изготовления заготовок деталей газотурбинных двигателей.

Библиографический список

1. 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.
2. Каблов Е.Н. ВИАМ: Материалы нового поколения для ПД-14 // *Крылья Родины*. 2019. № 7–8. С. 54–58.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А., Нарский А.Р. Перспективы создания высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких матриц и естественных композитов // *Вопросы материаловедения*. 2020. № 4 (104). С. 64–78.
4. Антипов В.В. Перспективы развития алюминиевых, магниевых и титановых сплавов для изделий авиационно-космической техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 186–194. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-186-194.
5. Ночовная Н.А., Иванов В.И. Перспективы применения жаропрочных материалов на основе алюминидов титана // *Международ. конф. «Ti-2006 в СНГ» (Суздаль, 21–24 мая 2006 г.)*. Верхняя Салда, 2006. С. 39–43.
6. 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. 318 с.
7. Leyens C., Hausmann J., Kumpf J. Continuous Fiber Reinforced Titanium Matrix Composites Fabrication, Properties and Application // *Titanium and Titanium Alloys. Fundamental and Application* / ed. by C. Leyens, M. Peters. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003. P. 305–331.
8. Dey S.R., Roy S., Suwas S. et al. Annealing response of the intermetallic alloy Ti–22Al–25Nb // *Journal of Intermetallics*. 2010. Vol. 18. No. 6. P. 1122–1131.
9. Ma X., Zeng W., Xu B. et al. Characterization of the hot deformation behavior of a Ti–22Al–25Nb alloy using processing maps based on the Murry criterion // *Journal of Intermetallics*. 2012. Vol. 20. No. 1. P. 1–7.
10. Nochovnaya N., Alexeev E., Izotova A., Ivanov V. Opportunities of increase of mechanical properties of the deformed semifinished products from Ti–Al–Nb system alloys // *Proceeding of the 12th World Conference on «Ti-2011»*. Beijing: Science Press, 2011. Vol. 2. P. 1383–1386.
11. Wang W., Zeng W., Chen X. et al. Microstructural control and mechanical properties from isothermal forging and heat treatment of Ti–22Al–25Nb (at. %) Orthorhombic alloy // *Journal of Intermetallics*. 2015. Vol. 56. P. 79–86.
12. Shang J.L., Guo H.-Z., Liang H.-Q. Hot deformation behavior and process parameter optimization of Ti–22Al–25 Nb using processing map // *Journal Rare Metals*. 2016. Vol. 35. No. 1. P. 118–126.
13. 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*. 2018. № 6 (66). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-12-21.
14. Алексеев Е.Б., Ночовная Н.А., Новак А.В., Панин П.В. Деформируемый интерметаллидный титановый орто-сплав, легированный иттрием. Часть 2. Исследование влияния термической обработки на микроструктуру и механические свойства катаной плиты // *Труды ВИАМ*. 2018. № 12 (72). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 14.01.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-37-45.
15. 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*. 2018. № 2 (62). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.08.2021). DOI: 10.185777/2307-6046-2018-0-2-5-5.