

СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al ПРИ КОМПЛЕКСНОМ ЛЕГИРОВАНИИ

С. А. Фирстов¹, И. Д. Горная¹, Ю. Н. Подрезов¹,
А. А. Бондарь¹, А. В. Шереметьев²

¹Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,
03142, г. Киев, ул. Кржижановского, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²ГП «Ивченко-Прогресс».

69068, г. Запорожье, ул. Иванова, 2. E-mail: progress@ivchenko-progress.com

Представлены результаты изучения влияния комплексного легирования Nb (3...4 %), Mo, Cr, Zr (до 2 %), V, Y (до 0,2 %) на механические свойства литых интерметаллидных γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al сплавов, содержащих от 44,0 до 48,5 % Al, полученных способом вакуумно-дугового переплава. Определены механические свойства при испытаниях на изгиб, одноосные растяжение и сжатие. Измерены твердость по Виккерсу и длительная горячая твердость (жаропрочность). Испытания проводили в температурном интервале 20...800 °С. Показано, что оптимальные свойства при растяжении при 20 и 700 °С демонстрирует литой сплав Ti-47Al-5,5(Nb, Cr, Mo): модуль упругости составляет примерно 170 и 126 ГПа, предел прочности — 770 и 644 МПа, пластичность — 0,15 и 0,65 % соответственно. Трещиностойкость этого сплава составляет приблизительно 22,4 МПа·м^{1/2}, длительная горячая твердость при 700 °С — 2,0 ГПа, что вдвое превышает значение твердости высокотемпературных титановых сплавов. Библиогр. 20, табл. 5, ил. 1.

Ключевые слова: титановые сплавы; алюминиды титана; легирование; механические свойства; жаропрочность

За счет малой плотности (4,2...3,9 г/см³), термодинамической стабильности и жаростойкости, повышенной жесткости и высокой удельной прочности в интервале температур 600...750 °С сплавы на основе алюминидов титана γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al рассматриваются как наиболее перспективные, отвечающие современным требованиям авиакосмической, авиационной и автомобильной промышленности [1–7]. Замена суперсплавов на никелевой основе сплавами на основе алюминидов титана позволит снизить вес деталей ГТД и ГТУ в 1,5...2,0 раза вместе с их удешевлением почти на треть. Актуальной остается также задача повышения температуры, которая для коммерческих жаропрочных титановых сплавов типа IM834, VT18U, VT41 составляет 550...600 °С, что является недостаточным для деталей компрессора и турбины ГТД нового поколения. Несмотря на большой объем работ, посвященных разработке и исследованию γ -TiAl сплавов, проблема достижения оптимального баланса свойств в литом состоянии для удешевления процессов их производства остается актуальной, поэтому необходимо продолжение исследований влияния легирования, в первую очередь Nb, в комплексе с другими β -стабилизирующими и модифицирующими элементами на свойства γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al сплавов [8–14].

Целью настоящей работы является изучение влияния комплексного легирования Nb, Mo, Cr, Zr, V и Y на физико-механические свойства литых интерметаллидных γ -TiAl сплавов разного номинального состава.

Материалы и способы исследования. Для исследований выплавлены две серии γ -TiAl сплавов, легированных 3...4 % Nb, Mo, Cr, Zr (до 2 %), V и Y (до 0,2 %) с содержанием от 44 до 48,5 % Al (тут и далее ат. %).

Слитки сплавов серии 1 получены способом вакуумно-дугового переплава в лабораторной вакуумно-дуговой печи в медном цилиндрическом охлаждаемом водой кристаллизаторе в среде аргона путем послойного расплавления спрессованных шихтовых брикетов [15]. Для слитков диаметром 65...70 мм, длиной 12 мм и весом приблизительно 200 г в качестве исходных материалов использовали губчатый титан МНТ-100 и металлы технической чистоты. Бор вводили в виде лигатуры 94Al–5Ti–1B (мас. %). Химический состав сплавов серии 1 и твердость по Виккерсу представлены в табл. 1. Сплав номер 6–1 имеет такой же состав, что и сплав 5–1, но выплавлен с использованием титановой губки ТГ100 производства Запорожского титано-магниевого комбината (ЗТМК).

Таблица 1. Химический состав и твердость по Виккерсу γ -TiAl сплавов серии 1

Номер сплава	Состав		HV 30, ГПа
	ат. %	мас. %	
1-1	Ti-44Al-5,5(Nb, Cr, Mo)	Ti-29Al-12 (Nb, Cr, Mo)	4,3
2-1	Ti-44Al-5,7(Nb, Cr, Mo, B)	Ti-29Al-12,1(Nb, Cr, Mo, B)	4,1
3-1	Ti-44Al-5,7(Nb, Cr, Mo, Y)	Ti-29Al-12,5(Nb, Cr, Mo, Y)	4,5
4-1	Ti-47Al-4,8(Nb, Cr, Mo, Zr)	Ti-31,6Al-10,2(Nb, Cr, Mo, Zr)	3,7
5-1	Ti-47Al-5,5(Nb, Cr, Mo)	Ti-32,4Al-12,2(Nb, Cr, Mo)	3,5
6-1	Ti-47Al-5,5(Nb, Cr, Mo)	Ti-32,4Al-12,2(Nb, Cr, Mo)	3,2

Для определения влияния микролегирования бором выплавлено серию 2 модельных слитков, составы которых и твердость по Виккерсу приведены в табл. 2. Для сравнения свойств химический состав сплава номер 6-2 (без добавок бора) соответствует составу сплава номер 5-1 серии 1. Слитки весом приблизительно 15 г изготовлены способом аргоно-дуговой плавки в электродуговой печи с использованием нерасходуемого вольфрамового электрода на медном поду с водным охлаждением и позволяющим получать более качественные сплавы [12].

Изучение структурно-фазового состояния сплавов выполняли способами оптической металлографии (ОМ), сканирующей (СЭМ) и трансмиссионной (ТЭМ) электронной микроскопии, рентгеновского анализа. Механические свойства сплавов изучали при испытаниях на одноосные растяжение и сжатие при температурах 20 и 700 °С. Испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ-1497 на образцах диаметром 3 мм и длиной рабочей части 15 мм со скоростью деформации 10^{-3} с^{-1} . Удлинение фиксировали тензометрическими датчиками непосредственно с рабочей части образца. Конструкция тензометра позволяла определять деформацию образца с чувствительностью 10^{-5} и измерять модуль упругости с погрешностью не более 2 %.

Испытания на сжатие проводили со скоростью деформации 10^{-3} с^{-1} при 20 и 700 °С методом построения диаграмм нагрузка-деформация. Образцы имели размер $3 \times 3 \times 5$ мм согласно ГОСТ

11150-75. Для расчета трещиностойкости сплавов использовали данные испытания образцов на трехточечный изгиб при 20 °С. Жаропрочность сплавов оценивали экспресс-методом измерения долговременной горячей твердости с нагрузкой 10 Н в интервале температур 20...800 °С [16]. Измерения твердости сплавов по Виккерсу проводили при нагрузке 30 Н.

Результаты и обсуждение. Структурные исследования показали, что все сплавы имеют типичную литую дендритную структуру, размер зерна которой зависит от их состава. Так, литой сплав номер 1-1 (44 % Al) состоит из кристаллитов размером до нескольких миллиметров (рисунок, а). Дополнительное легирование бором, как известно, приводит к значительному измельчению структуры сплавов на основе γ -TiAl [17], поэтому размер зерна сплава номер 2-1 с добавкой бора уменьшился до десятков микрометров (рисунок, б). Увеличение концентрации алюминия до 47 % при одинаковом содержании легирующих элементов (сплав номер 5-1) обусловило формирование четко выраженной lamellarной структуры, состоящей из двух фаз алюминидов титана — γ -TiAl и α_2 -Ti₃Al (рисунок, в, г). Согласно данным рентгенофазового анализа, СЭМ и ТЭМ в структуре изучаемых сплавов наблюдается небольшое количество β -фазы, имеющей ОЦК решетку.

Результаты измерения твердости по Виккерсу серии 1 литых γ -TiAl сплавов представлены в табл. 1. По уровню значений твердости (выше

Таблица 2. Химический состав и твердость по Виккерсу γ -TiAl сплавов серии 2

Номер сплава	Состав		HV 30, ГПа
	ат. %	мас. %	
1-2	Ti-44Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti-29Al-12,1(Nb, Cr, Mo, B)	4,4
2-2	Ti-45,5Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti-30,2Al-12,2(Nb, Cr, Mo, B)	3,7
3-2	Ti-47Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti-31,4Al-12,3(Nb, Cr, Mo, B)	3,2
4-2	Ti-48,5Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti-32,7Al-12,4(Nb, Cr, Mo, B)	2,9
5-2	Ti-47Al-4,6(Nb, Cr, Mo, B)	Ti-31,8Al-10,1(Nb, Cr, Mo, B)	3,3
6-2	Ti-47Al-5,5(Nb, Cr, Mo)	Ti-31,4Al-12,2(Nb, Cr, Mo)	3,5

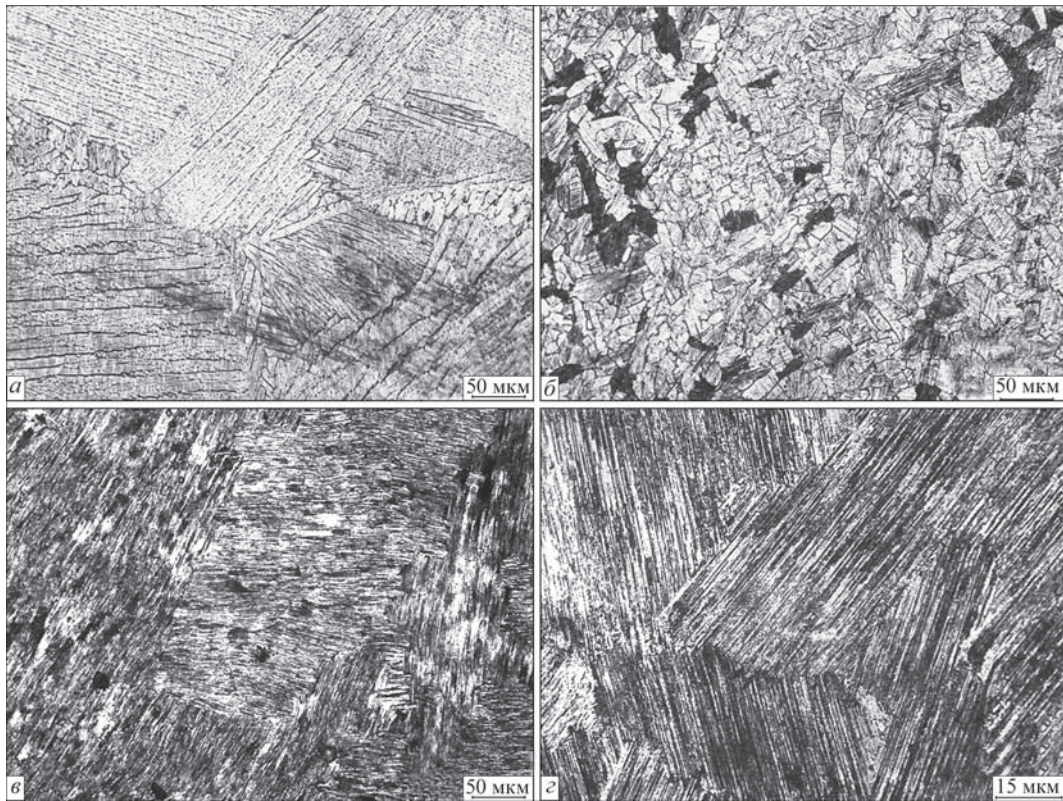


Рис. 1. Микроструктура литых γ -TiAl сплавов: *a* — номер 1–1 (Ti–44Al–5,5(Nb, Cr, Mo)); *b* — 2–1 (Ti–44Al–5,7(Nb, Cr, Mo, B)); *c, d* — 5–1 (Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo) (OM))

и ниже 4 ГПа) сплавы можно разделить на две группы. К первой относятся сплавы номер 1–1, 2–1, 3–1 с 44 % Al. Более высокие значения твердости первой группы сплавов по сравнению со второй объясняются как увеличением соотношения объемной доли α_2 -/ γ -фаз при уменьшении концентрации Al [4–6], так и существенным диспергированием структуры литых сплавов за счет модифицирующего эффекта B, Y [17–19]. Вторая группа сплавов номера 4–1, 5–1 и 6–1 содержат 47 % Al и, соответственно, большую объемную долю менее жесткой γ -TiAl фазы. Сплав номер

6–1 имеет самую низкую твердость примерно 3,2 ГПа, что может быть результатом использования в качестве исходного материала более чистой по содержанию кислорода титановой губки производства ЗТМК.

В табл. 3 представлены механические свойства литых γ -TiAl сплавов серии 1: трещиностойкость (K_{Ic}), модуль упругости (E), предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_B), относительное удлинение (δ) и поперечное сужение (ψ), которые определяли при испытаниях на одноосное растяжение при температурах 20 и 700 °С.

Т а б л и ц а 3. Влияние легирования на трещиностойкость и механические свойства серии γ -TiAl сплавов серии 1 при одноосном растяжении при 20 и 700 °С

Номер сплава	Состав, ат. %	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	$T_{исп}$, °С	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
1–1	Ti–44Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	16,1	20	158	–	512	0,17	1,0
			700	116	463	501	0,28	0,57
2–1	Ti–44Al–5,7(Nb, Cr, Mo, B)	13,6	20	187	–	533	0,02	0,07
			700	113	516	562	0,28	2,6
3–1	Ti–44Al–5,7(Nb, Cr, Mo, Y)	14,8	20	170	–	523	0,03	0,14
			700	122	–	454	0,12	2,3
4–1	Ti–47Al–4,8(Nb, Cr, Mo, Zr)	20,8	20	185	394	504	0,35	1,4
			700	130	396	555	0,65	2,3
5–1	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	22,4	20	170	–	770	0,15	1,2
			700	126	543	644	0,45	2,9
6–1	Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo)	21,8	20	171	510	548	0,28	0,28
			700	133	400	514	0,28	2,6

Т а б л и ц а 4. Влияние легирования на трещиностойкость и механические свойства литых γ -TiAl сплавов серии 2 при испытаниях на сжатие при 20 и 700 °С

Номер сплава	Состав сплава (ат. %)	K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	$T_{исп}$, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_p , МПа	ϵ , %
1-2	Ti-44Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	14,0	20	861	1688	7,0
			700	1119	2284	17,2
2-2	Ti-45,5Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	16,7	20	809	2096	12,8
			700	844	2020	19,4
3-2	Ti-47Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	24,8	20	745	2577	16,2
			700	879	2974	27,0
4-2	Ti-48,5Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	14,0	20	668	2181	16,2
			700	551	2735	31,1
5-2	Ti-47Al-4,6(Nb, Cr, Mo, B)	26,4	20	852	2315	12,1
			700	617	2951	7,2
6-2	Ti-47Al-5,5(Nb, Cr, Mo)	24,4	20	814	2030	7,9
			700	867	2059	9,1
5-1	Ti-47Al-5,5(Nb, Cr, Mo)	22,4	20	852	2444	11,9
			700	844	2547	32,7

Следует отметить, что литым γ -TiAl сплавам при комнатной температуре свойственны малая пластичность и низкая технологичность [4–6], приводящие к проблемам изготовления стандартных образцов и проведения испытаний на растяжение. Кроме того, наличие литейных дефектов и примесей, поступивших из исходной титановой губки, неоднородность химического состава по сечению слитка могут также влиять на качество образцов и достоверность полученных экспериментальных данных.

Анализ результатов испытаний на растяжение образцов сплавов серии 1 показал, что практически все исследованные сплавы при 20 °С имеют достаточно высокие модули упругости на уровне 158...187 ГПа. Среди указанных сплавов модули упругости сплавов номер 4-1 и 5-1 сохраняют высокие значения и при 700 °С, а именно 130 и 126 ГПа соответственно. Наибольшие значения трещиностойкости (20,8...22,4 МПа·м^{1/2}) демонстрируют сплавы под номерами 4-1, 5-1 и 6-1 с содержанием 47 % Al.

Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что при испытаниях образцов на растяжение в большинстве случаев не удалось достичь необходимого предела текучести по причинам, указанным выше. Это касается сплавов номер 1-1, 2-1 и 3-1 с содержанием 44 % Al. Два последних указанных сплава, легированных дополнительно бором и иттрием, имеют минимальную пластичность приблизительно 0,02...0,03 %. Измеренные при 20 °С пределы текучести ($\sigma_{0,2}$) сплавов 4-1 и 6-1 равны 394 и 510 МПа соответственно.

Максимальные значения предела прочности при 20 °С демонстрируют сплавы 5-1 и 6-1 — 770 и 548 МПа соответственно. Пластичность этих сплавов равна примерно 0,28 и 0,15 %. Сплав номер 4-1 имеет предел прочности 504 МПа и максимальную среди всех исследуемых сплавов пластичность в литом состоянии около 0,35 %. При 700 °С максимальные значения предела прочности имеют сплавы номер 2-1 (562 МПа), 4-1 (555 МПа) и 5-1 (644 МПа). Таким образом, среди сплавов серии 1 оптимальный баланс всех механических характе-

Т а б л и ц а 5. Влияние легирования на длительную горячую твердость литых γ -TiAl сплавов в интервале температур 20...800 °С

Номер сплава	Состав, ат. %	Температура, °С				
		20	500	700	750	800
1-1	Ti-4Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	3,0	2,8	2,3	2,2	1,8
2-1	Ti-45,5Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	2,8	2,6	2,1	1,8	1,6
3-1	Ti-47Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	3,4	3,2	2,5	2,5	2,1
4-1	Ti-48,5Al-5,6(Nb, Cr, Mo, B)	2,5	1,9	1,9	1,6	1,6
5-1	Ti-47Al-4,6(Nb, Cr, Mo, B)	2,9	2,6	2,0	1,7	1,6
6-1	Ti-47Al-5,5(Nb, Cr, Mo)	2,6	2,1	1,6	1,6	1,4
5-2	Ti-47Al-4,6(Nb, Cr, Mo, B)	2,5	2,1	1,8	1,8	1,4
6-2	Ti-47Al-5,5(Nb, Cr, Mo)	2,6	2,3	2,0	1,7	1,5

ристик наблюдается для литого сплава номер 5–1, имеющего состав Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo).

Механические свойства образцов серии 2 литых γ -TiAl сплавов, учитывая небольшие размеры слитков, определяли при испытаниях на сжатие при 20 и 700 °С (табл. 4). Для сравнения в табл. 4 представлены также свойства сплава номер 5–1 (серия 1). Отмечается, что наиболее высокий уровень механических свойств как при 20 °С, так и при 700 °С имеют сплавы, содержащие 47 % Al (номера 3–2, 5–2, 6–2). Указанные сплавы наряду со сплавом номер 5–1 показывают и наибольшие значения трещиностойкости (24,4...26,4 МПа·м^{1/2}). Сплавы номер 3–2 и 5–2 (дополнительно легированные бором) имеют самые высокие прочностные характеристики при 20 и 700 °С. У сплава номер 6–2 наблюдается несколько пониженное разрушающее напряжение по сравнению со сплавом 5–1 серии 1, имеющего с ним одинаковый состав, что может быть связано с разными технологиями изготовления слитков.

Результаты измерения длительной горячей твердости (жаропрочности) литых γ -TiAl сплавов серии 1 и сплавов 5–2 и 6–2 серии 2 представлены в табл. 5. Высокие значения жаропрочности при температурах 700...750 °С имеет группа сплавов с содержанием 44 % Al. Сплавы 4–1, 5–1 и 6–1 при температуре 700 °С имеют близкие значения длительной твердости 1,9...2,0 ГПа, которые практически в два раза превышают значения твердости высокотемпературных титановых сплавов с металлической матрицей α -Ti [20].

Выводы

1. Показано, что комплексное легирование (3–4 % Nb, до 2 % (Mo, Cr, Zr), до 0,2 % (B, Y)) литых γ -TiAl сплавов с содержанием Al от 44,0 до 48,5 % обеспечило оптимальное сочетание физико-механических свойств, включая трещиностойкость и низкотемпературную пластичность у сплавов, содержащих 47 % Al.

2. Установлено, что дополнительное легирование бором и иттрием литых γ -TiAl сплавов, содержащих 44 % Al, резко измельчает зерно в литом состоянии до десятков микрометров, но, к сожалению, снижает пластичность при комнатной температуре.

3. Испытания на сжатие показали, что добавки бора приводят к значительному повышению прочностных свойств литых γ -TiAl сплавов, содержащих 47 % Al как при комнатной, так и при повышенных температурах.

4. Установлено, что оптимальный баланс свойств при 20 и 700 °С среди изученных литых γ -TiAl сплавов имеет сплав Ti–47Al–5,5(Nb, Cr, Mo) (номер 5–1): модуль упругости (E) равен примерно 170 и 126 ГПа, предел прочности при одноосном растяжении (σ_B) — 770 и 644 МПа, пластичность (δ) — 0,15 и 0,65 % соответственно. Трещиностойкость этого сплава (K_{Ic}) — 22,4 МПа·м^{1/2}. Длительная твердость сплава (жаропрочность) при 700 °С составляет около 2,0 ГПа, что практически вдвое превышает значение длительной твердости высокотемпературных титановых сплавов.

Список литературы

1. Clemens H., Mayer S. (2016) Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications—processing, microstructure and properties. *Materials at high temperatures*. <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792>
2. Bewlay B. P., Nag S., Suzuki A., Weimer M. J. (2016) TiAl alloys in commercial aircraft engines. *Ibid.* <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068>
3. Toshimitsu Tetsui. (2002) Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Materials Science and Engineering*, **A329–331**, 582–588.
4. Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. (2008) *Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок*. Т. 2. (Газотурбинные двигатели). Москва, Машиностроение.
5. Appel F., Paul J. D. H., Oehring M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: science and technology*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
6. Kim Y.-W., Smarsly W., Lin J. et al. (2014) Gamma titanium aluminide alloys, 2014: a collection of research on innovation and commercialization of gamma alloy technology. *4th International Symposium on Gamma TiAl alloys, ISGTA 2014*. Hoboken (NJ), John Wiley & Sons, Inc.
7. Christoph Leyens, Manfred Peters (2003) *Titanium and titanium alloys: fundamentals and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
8. Wu X. (2006) Review of alloy and processing development of TiAl alloys. *Intermetallics*, **14**, 1114–1122.
9. Lapin J. (2009) TiAl-based alloys: Present status and future perspectives. *Hradec nad Moravicí, Metal*, **19**.
10. Hu D., Wu X., Loretto M. H. (2005) Advances in optimization of mechanical properties in cast TiAl alloys. *Intermetallics*, **13**, 914–919.
11. Фірстов С. О., Горна І. Д., Порядченко Н. Е. та ін. (2010) Високотемпературні властивості комплексно легованих сплавів на основі алюмінідів титану. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **8**, 145–150.
12. Бондар А. А., Вітусевич В. Т., Ремез М. В. та ін. (2011) Структура та властивості титан-алюмінідних сплавів, легованих ніобієм і танталом. *Порошковая металлургия*, **7–8**, 25–45.
13. Подрезов Ю. Н., Ремез М. В., Горная И. Д. и др. (2012) Температурная зависимость механических свойств сплавов на основе интерметаллида TiAl. *Сб.: «Электронная микроскопия и прочность материалов»*. Киев, ИПМ НАНУ, **18**, сс. 57–74.
14. Ремез М. В., Подрезов Ю. М., Бондар А. А. та ін. (2016) Структура та властивості сплавів на основі TiAl, легованих ніобієм і хромом. *Порошковая металлургия*, **1–2**, 104–112.

15. Голтвяниця С. К., Голтвяниця В. С., Цивірко Е. І. (2006) Отримання щільних та однорідних виливків зі сплаву титан-алюміній. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **1**, 57–59.
16. Борисенко В. А. (1984) *Твердость и прочность тугоплавких материалов при высоких температурах*. Киев, Наукова думка.
17. Hu D. (2002) Effect of boron addition on tensile ductility in lamellar TiAl alloys. *Intermetallics*, **10**, 851–858.
18. Wu Y., Hwang S. K. (2002) Microstructural refinement and improvement of mechanical properties and oxidation resistance in EPM TiAl-based intermetallics with yttrium additions. *Acta Materialia*, **50**, 1479–1493.
19. Горна І. Д., Яблокова Г. В., Тіньков В. О. та ін. (2010) Вплив Y на структуру і властивості литого інтерметалідного сплаву Ti–36Al. Повідомлення 1. Структура і твердість литих сплавів Ti–36Al–Y. *Сб.: Современныe проблемы физического материаловедения*. Киев, ИПМ НАНУ, **19**, сс. 122–127.
20. Горна І. Д., Горпенко К. О., Коваль О. Ю. та ін. (2008) Структура та фізико-механічні властивості сплавів системи Ti–Si–X. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **3**, 35–42.
7. Christoph Leyens, Manfred Peters (2003) *Titanium and titanium alloys: Fundamentals and applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
8. Wu, X. (2006) Review of alloy and processing development of TiAl alloys. *Intermetallics*, **14**, 1114–1122.
9. Lapin, J. (2009) TiAl-based alloys: Present status and future perspectives. *Hradec nad Moravicí, Metal*, **19**.
10. Hu, D., Wu, X., Loretto, M. H. (2005) Advances in optimization of mechanical properties in cast TiAl alloys. *Intermetallics*, **13**, 914–919.
11. Firstov, S.O., Gorna, I.D., Poryadchenko, N.E. et al. (2010) High-temperature properties of complex alloys based on titanium aluminides. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **8**, 145–150 [in Ukrainian].
12. Bondar, A.A., Vitusevych, V.T., Remez, M.V. et al. (2011) Structure and properties of titanium-aluminide alloys doped with niobium and tantalum. *Poroshk. Metallurgiya*, **7–8**, 25–45 [in Ukrainian].
13. Podrezov, Yu.N., Remez, M.V., Gornaya, I.D. et al. (2012) Temperature dependence of mechanical properties of alloys based on TiAl intermetallics. In: *Electron microscopy and strength of materials: Transact. Kiev, IPMS*, **18**, 57–74 [in Russian].
14. Remez, M.V., Podrezov, Yu.M., Bondar, A.A. et al. (2016) Structure and properties of TiAl-based alloys doped with niobium and chrome. *Poroshk. Metallurgiya*, **1–2**, 104–112 [in Ukrainian].
15. Goltvyanytsya, S.K., Goltvyanytsya, V.S., Tsyvirko, E.I. (2006) Production of solid homogeneous ingots of titanium-aluminum alloy. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metallurgii ta Mashynobuduvanni*, **1**, 57–59 [in Ukrainian].
16. Borisenko, V.A. (1984) *Hardness and strength of heat-resistant materials at high temperatures*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
17. Hu, D. (2002) Effect of boron addition on tensile ductility in lamellar TiAl alloys. *Intermetallics*, **10**, 851–858.
18. Wu, Y., Hwang, S. K. (2002) Microstructural refinement and improvement of mechanical properties and oxidation resistance in EPM TiAl-based intermetallics with yttrium additions. *Acta Materialia*, **50**, 1479–1493.
19. Gorna, I.D., Yablokova, G.V., Tinkov, V.O. et al. (2010) Effect of Y on structure and properties of cast intermetallic alloy Ti–36Al–Y. Information 1: Structure and hardness of cast alloys Ti–36Al–Y. In: *Current problems of physical materials science: Transact. Kiev, IPMS*, **19**, 122–127 [in Ukrainian].
20. Gorna, I.D., Gorpenko, K.O., Koval, O.Yu. et al. (2008) Structure and physico-mechanical properties of alloys of Ti–Si–X system. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **3**, 35–42 [in Ukrainian].

References

1. Clemens, H., Mayer, S. (2016) Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications — processing, microstructure and properties. *Materials at high temperatures*. <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792>
2. Bewlay, B. P., Nag, S., Suzuki, A., Weimer, M. J. (2016) TiAl alloys in commercial aircraft engines. *Ibid.* <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1183068>
3. Toshimitsu Tetsui (2002) Development of a TiAl turbocharger for passenger vehicles. *Mater. Sci. and Engin.*, **A329–331**, 582–588.
4. Inozemtsev, A.A., Nikhamkin, M.A., Sandratsky, V.L. (2008) *Fundamentals of design of aircraft engines and power units*. Vol. 2: Gas turbine engines. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
5. Appel, F., Paul, J. D. H., Oehring, M. (2011) *Gamma titanium aluminide alloys: Science and technology*. Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
6. Kim, Y.-W., Smarsly, W., Lin, J. et al. (2014) Gamma titanium aluminide alloys, 2014: A collection of research on innovation and commercialization of gamma alloy technology. In: *Proc. of 4th Intern. Symp. on Gamma TiAl Alloys, ISGTA 2014*. Hoboken (NJ), John Wiley & Sons, Inc.

ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ ЛЕГУВАННІ

С. О. Фірстов¹, І. Д. Горна¹, Ю. М. Подрезов¹, А. А. Бондарь¹, О. В. Шереметьєв²

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

03142, м. Київ, вул. Кржижановського, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²ДП «Івченко-Прогрес».

69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2. E-mail: progress@ivchenko-progress.com

Представлено результати вивчення впливу комплексного легування Nb (3...4%), Mo, Cr, Zr (до 2%), В, Y (до 0,2%) на механічні властивості литих інтерметалідних γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al сплавів з вмістом Al від 44,0 до 48,5%, отриманих способом вакуумно-дугового переплаву. Визначено механічні властивості в випробуваннях на згин, одновісний стиснення і розтягування. Вимірювані твердість по Віккерсу і довготривала гаряча твердість (жароміцність). Випробування проводили в температурному інтервалі 20...800 °С. Показано, що оптимальні властивості при розтягуванні при 20 і 700 °С демонструє литий сплав Ti–47Al–5,5 (Nb, Cr, Mo): модуль пружності

становить майже 170 і 126 ГПа, границя міцності — 770 і 644 МПа, пластичність — 0,15 і 0,65 % відповідно. Тріщиностійкість цього сплаву складає приблизно 22,4 МПа·м^{1/2}, довготривала гаряча твердість при 700 °С — майже 2,0 ГПа, що практично вдвічі перевершує значення твердості високотемпературних титанових сплавів. Бібліогр. 20, табл. 5, іл. 1.

Ключові слова: титанові сплави; алюмініди титану; легування; механічні властивості; жароміцність

PROPERTIES OF ALLOYS ON TITANIUM ALUMINIDE γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al BASE AT COMPLEX ALLOYING

S.A. Firstov¹, I.D. Gornaya¹, Yu.N. Podrezov¹, A.A. Bondar¹, A.V. Sheremetjev²

¹I.N. Frantsevich Institute of Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine.

3 Krzhyzhanovsky Str., 03142, Kyiv. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²SE «Ivchenko-Progress».

2 Ivanov Str., 69068, Zaporozhye. E-mail: progress@ivchenko-progress.com

Presented are the results of study of effect of a complex alloying by Nb (3...4 %), Mo, Cr, Zr (up to 2 %), B, Y (up to 0.2 %) on mechanical properties of cast intermetallic γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al alloys, containing from 44.0 up to 48.5 % Al, produced by the method of vacuum arc remelting. The mechanical properties were determined at bending, uniaxial tension and compression tests. Vickers hardness and long-time hot hardness (high-temperature strength) were measured. The tests were carried out within the temperature interval of 20...800 °C. It was shown that the optimum properties during tension at 20 and 700 °C were demonstrated by the cast alloy Ti-47Al-5.5 (Nb, Cr, Mo); coefficient of elasticity was approximately 170 and 126 GPa, tensile strength was 770 and 644 MPa, ductility was 0.15 and 0.65 %, respectively. Crack resistance of this alloy is approximately 22.4 МПа·м^{1/2}, long-time hot hardness at 700 °C is 2.0 GPa, that twice increases the value of hardness of high-temperature titanium alloys. 20 Ref., 5 Tabl., 1 Fig.

Key words: titanium alloys; titanium aluminides; alloying; mechanical properties; high-temperature strength

Поступила 09.07.2018

НОВАЯ КНИГА



Мазур А. А. Очерки истории Патоновской научной школы: сборник. — 2-е изд., испр., доп. — Киев: ИЭС; Харьков: ФЛП Либуркина Л. М., 2018. — 216 с. ISBN 978-966-8177-89-7

В сборнике представлена информация о всемирно известной Патоновской научно-инженерной школе в области сварки и родственных технологий, которая создана выдающимся ученым академиком Е. О. Патоном и развита достойным продолжателем его дела академиком Б. Е. Патоном. Освещены основные этапы и принципы создания и развития этой школы, ее влияние на мировую сварочную науку и технику, вклад в обеспечение экономической и военной безопасности страны.

Сборник рассчитан на широкий круг читателей, которые интересуются вопросами научно-технического, инновационного и экономического развития страны, а также молодежи, выбирающей свой жизненный путь.

Заказы на сборник просьба направлять в редакцию журнала «Современная электрометаллургия»