

УДК 621.791

*О.С. Кашанов¹, Т.В. Павлова¹, В.С. Калашиников¹, А.Р. Кондратьева¹***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ
ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА СВОЙСТВА
ВЫСОКОПРОЧНОГО ЖАРОПРОЧНОГО ПСЕВДО- α -СПЛАВА VT46**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-6-6

Проведено исследование влияния содержания легирующих элементов (алюминия, олова, кремния и железа) на прочность и жаропрочность псевдо- α -сплава VT46 при комнатной и повышенных температурах (500 и 550°C). Установлено, что снижение содержания таких элементов, как алюминий, олово, кремний, по сравнению с номинальным составом приводит к снижению характеристик длительной прочности материала. Железо оказывает существенное влияние только на уровень кратковременной прочности при относительно низких температурах испытаний.

Ключевые слова: жаропрочные титановые сплавы, механические свойства, структура, химический состав.

The study of influence of alloying elements content (aluminum, tin, silicon and iron) in the near alpha titanium alloy VT46 in room and elevated temperatures (500 and 550°C) is performed. It is found that reducing the content of elements such as aluminum, tin, silicon comparing with a nominal composition leads to decrease in creep strength characteristics of the material. Content of iron has a significant effect only on the level of strength in relatively low test temperatures.

Keywords: heat-resistance titanium alloys, mechanical properties, structure, chemical composition.

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

ФГУП «ВИАМ» является основным разработчиком материалов, применяемых в авиационной и космической технике, в Российской Федерации [1–5]. Научная школа по созданию авиационных титановых сплавов и технологий изготовления полуфабрикатов, действующая в ВИАМ, насчитывает более 65 лет [6–11]. Актуальными задачами при разработке новых титановых сплавов для газотурбинных двигателей являются: повышение удельных характеристик прочности и жаропрочности, повышение технологичности и снижение себестоимости изготовления полуфабрикатов, обеспечение стабильности комплекса механических свойств. Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.2. «Квалификация и исследование материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1]. Перспективным направлением исследований является повышение уровня прочностных характеристик псевдо- α -сплавов, так как гарантированный уровень прочности серийно применяемых сплавов этого класса не превышает 930 МПа. Данная работа посвящена исследованию структуры и механических свойств нового высокопрочного жаропрочного титанового сплава VT46, который предназначен для изготовления силовых статорных и корпусных деталей ГТД с рабочей температурой до 550°C взамен серийного сплава VT20.

Материалы и методы

Для проведения исследования в условиях ФГУП «ВИАМ» методом двойного вакуумно-дугового переплава (ВДП) изготовлено четыре слитка. Первый слиток с условным номером 0 по химическому составу близок к номинальному составу для сплава ВТ46, при шихтовке остальных слитков снижали содержание одного из четырех легирующих элементов (Al, Fe, Sn, Si). Результаты анализа химического состава слитков после второго переплава приведены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав (основные компоненты) слитков из сплава ВТ46

Условный номер плавки (элемент)	Содержание элементов, % (по массе)									
	Al	Mo	Zr	Nb	V	Sn	Si	Fe	C	O
0	6,3	2,1	2,4	0,9	1,0	3,2	0,28	0,20		
1 (минимум Al)	5,4	1,9	2,0	1,0	0,7	2,4	0,22	0,23		
2 (минимум Fe)	5,8	1,9	2,2	0,7	0,7	2,3	0,23	0,15	0,005–0,009	0,04–0,05
3 (минимум Sn)	6,0	2,0	2,0	0,9	0,7	1,8	0,22	0,22		
4 (минимум Si)	6,2	2,1	2,5	0,7	0,9	2,4	0,15	0,20		

Микроструктура слитков сплавов 0–4 после второго переплава, исследованная на образцах, вырезанных из периферийной зоны донной части в поперечном сечении, приведена на рис. 1.

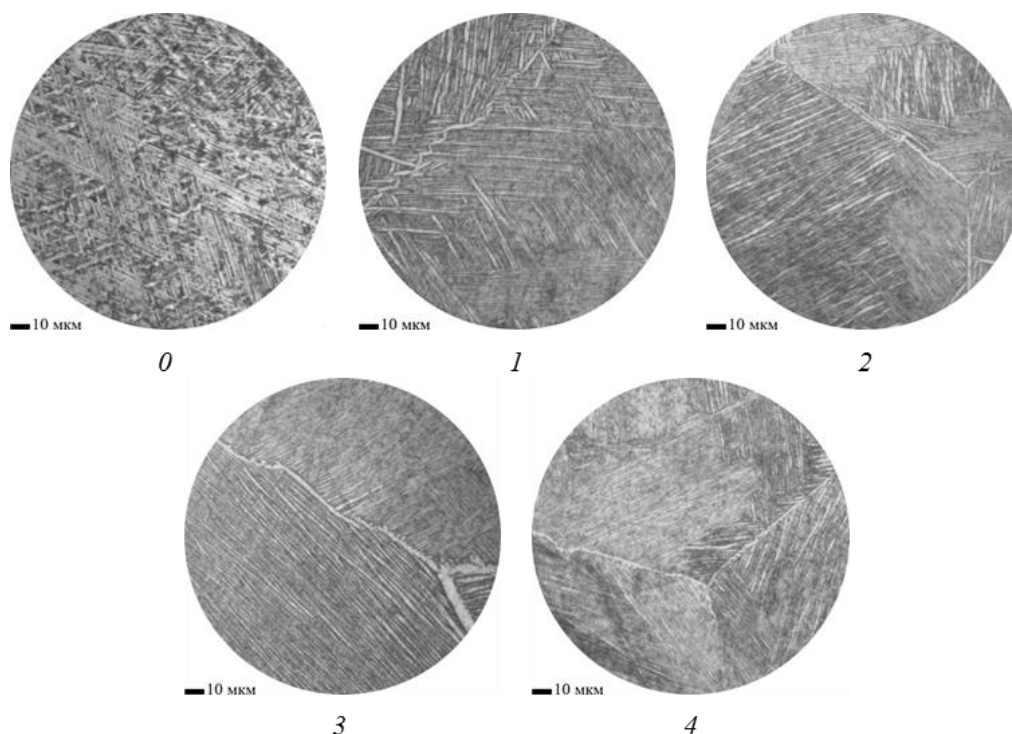


Рис. 1. Микроструктура слитков с условными номерами 0–4 (см. табл. 1)

Для получения деформированных полуфабрикатов слитки сплавов 1–4 диаметром 130 мм подвергали однократной всесторонней ковке при температуре нагрева заготовок в однофазной области и двукратной всесторонней ковке при температурах двухфазной области на прессе с усилием 1600 т. Полученные кованые прутки из сплавов 1–4 размером $\varnothing 55 \times (100-130)$ мм осаживали на высоту 28–30 мм по образующей и подкатывали на стане продольной прокатки до толщины 16–18 мм, нагрев (подогрев) заготовок под деформацию проводили при температурах верхней части ($\alpha+\beta$)-области. Из слитка сплава 0 диаметром 160 мм по аналогичной схеме изготовлен кованый пруток размером $\varnothing 135 \times 320$ мм, который после механической обработки осаживали в торец на высоту 42 мм с правкой граней при температурах нагрева (подогрева), соответствующих верхней части ($\alpha+\beta$)-области. Внешний вид деформированных полуфабрикатов приведен на рис. 2.

Типичная микроструктура материала после деформации приведена на рис. 3.

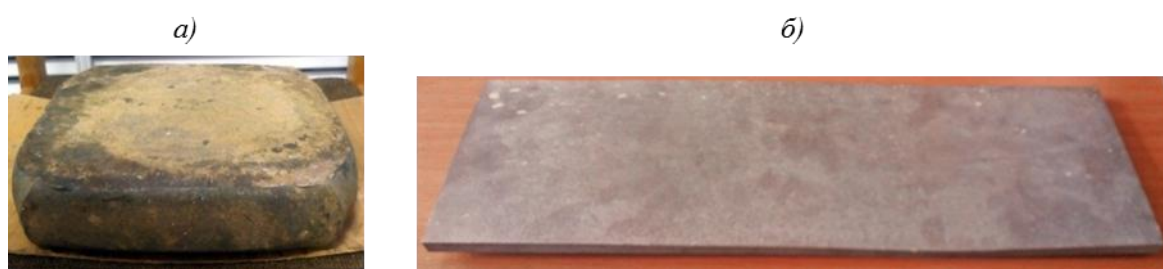


Рис. 2. Опытные поковки из сплава ВТ41:

a – поковка толщиной 42 мм из слитка 0; *б* – подкат из слитка 1 после обрезки краев и термической обработки

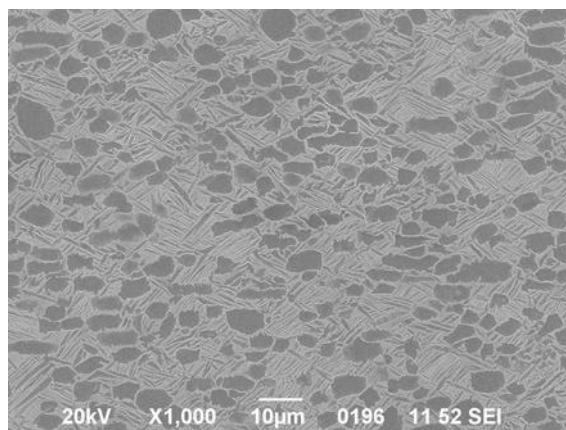


Рис. 3. Типичная микроструктура поковки из слитка 0 после деформации

Термическую обработку деформированных заготовок проводили по режиму двойного отжига при температуре первой ступени отжига на 20–30°C ниже температуры полного полиморфного превращения сплавов, продолжительность выдержки составила 2 ч. Обработку на твердый раствор проводили в промышленной печи.

Низкотемпературный отжиг заготовок под образцы для определения механических свойств проводили по одному и тому же режиму для материала всех плавок – нагрев до 570°C, выдержка 5 ч, охлаждение на воздухе. Анализ микроструктуры материала проводили по ПИ1.2.785–2009. Определение механических свойств осуществляли по стандартным методикам (ГОСТ 1497, ГОСТ 9454, ГОСТ 9651, ГОСТ 10145 и др.).

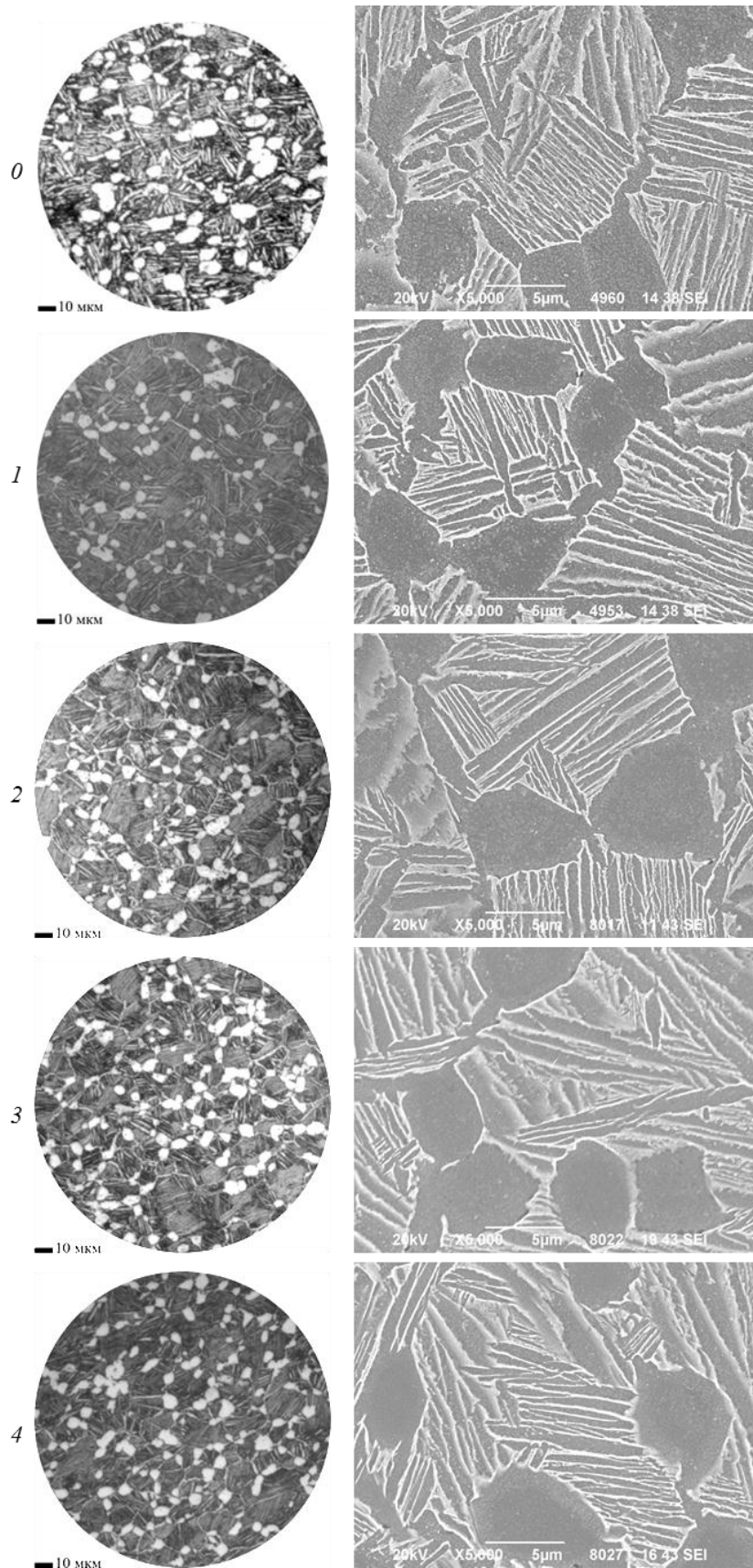


Рис. 4. Микроструктура деформированных заготовок в отожженном состоянии сплавов с условными номерами 0–4 (см. табл. 1)

Микроструктура материала деформированных заготовок в отожженном состоянии, полученная методами оптической и растровой электронной микроскопии, приведена на рис. 4.

Результаты и обсуждение

На поковках плавки 1–4 определены значения твердости материала по Роквеллу в состоянии после первой и второй ступеней отжига (рис. 5). На материале поковки 0 исследовано влияние режимов низкотемпературного отжига на твердость (рис. 6).

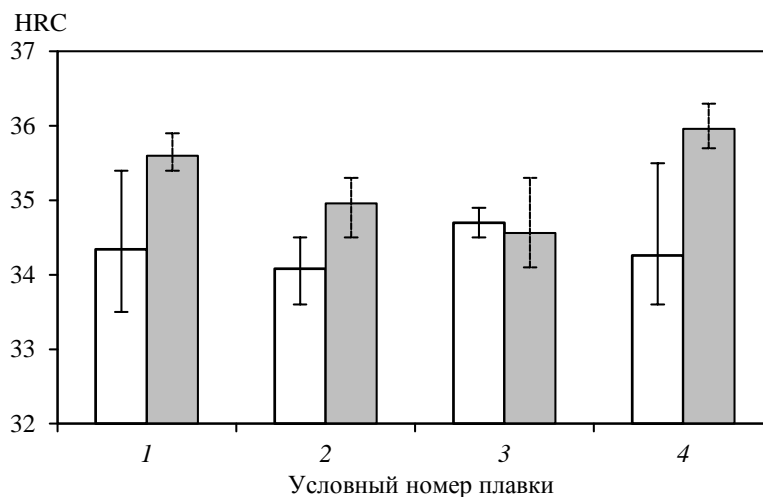


Рис. 5. Твердость материала деформированных заготовок после одноступенчатого (□) и двойного (■) отжига (по пять измерений на каждый образец)

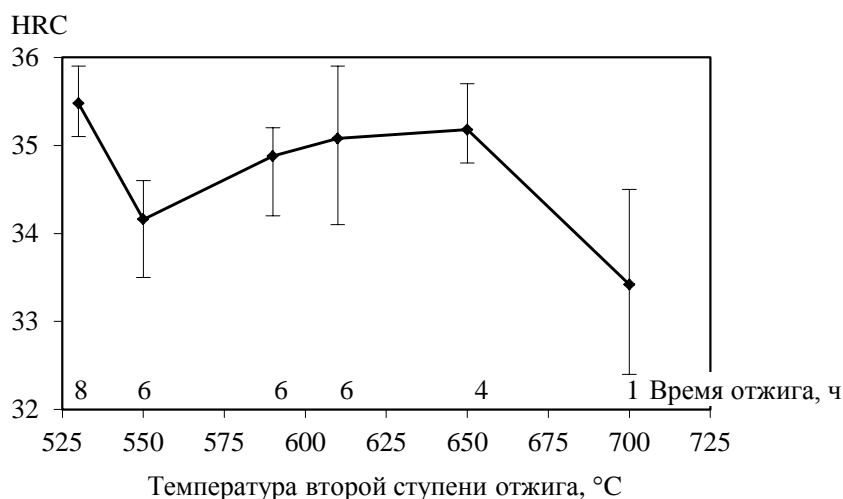


Рис. 6. Твердость материала поковки плавки 0 в зависимости от режима второй ступени отжига (по пять измерений на каждый образец)

Механические свойства и длительная прочность деформированных заготовок из сплава ВТ46 после двойного отжига в сравнении с серийными штамповками по ОСТ1 90002 из сплава ВТ20 в отожженном состоянии приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

**Механические свойства сплава ВТ46 в зависимости от химического состава
(средние значения по трем испытаниям)**

Условный номер плавки (см. табл. 1)	Температура испытания, °С	E, ГПа	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ , %	КСУ, кДж/м ²
			МПа			
0	20	120	–	1095	13,2	385
	500	85	650	840	18,5	–
	550	80	635	765	20,0	–
1 (минимум Al)	20	120	–	1060	16,0	465
	500	90	605	770	18,0	–
	550	79	585	725	21,5	–
2 (минимум Fe)	20	120	–	1050	18,0	420
	500	92	655	845	17,5	–
	550	78	595	735	22,5	–
3 (минимум Sn)	20	120	–	1060	15,5	390
	500	90	615	770	18,5	–
	550	85	585	725	21,0	–
4 (минимум Si)	20	120	–	1060	15,0	470
	500	89	625	785	18,5	–
	550	82	600	745	18,5	–
Серийные штамповки из сплава ВТ20	20	120	940	995	15,5	545
	500	82	535	675	–	–
	550	–	475	625	–	–

Таблица 3

**Длительная прочность (τ) сплава ВТ46 при различных температурах
в зависимости от химического состава**

Условный номер плавки (см. табл. 1)	Температура испытания, °С	σ , МПа	τ , ч	Примечание
0	500	490	235	Снят
		530	180	««
	550	335	235	««
		365	180	««
1 (минимум Al)	500	490	235	««
		530	180	««
	550	335	143	Разрушен
		335	146	««
2 (минимум Fe)	500	490	180	Снят
		530	135	««
	550	335	180	««
		365	165	««
3 (минимум Sn)	500	490	180	««
		530	135	««
	550	335	147	Разрушен
		335	207	««
4 (минимум Si)	500	490	180	Снят
		530	135	««
	550	335	169	Разрушен
		335	165	««
Серийные штамповки из сплава ВТ20	500	440	100	Гарантированное значение
	550	295	100	Среднее значение

Микроструктура опытных слитков всех плавов – пластинчатая, типичная для псевдо- α - и $(\alpha+\beta)$ -сплавов в литом состоянии (рис. 1). В процессе деформации и термической обработки при температурах $(\alpha+\beta)$ -области во всех исследованных полуфабрикатах получена микроструктура глобулярно-пластинчатого типа с объемной долей первичной α -фазы 15–25% (рис. 2). После обработки на твердый раствор (первая ступень отжига), заключающейся в нагреве до температур, близких к температуре полного полиморфного превращения, выдержке и охлаждении на воздухе со скоростью не менее 15°C/мин, средние значения твердости полуфабрикатов плавов 1–4 находятся на одном уровне (рис. 5). После низкотемпературного отжига (старения) максимальная твердость материала достигается для плавов 1 и 4 (с минимальным содержанием алюминия и кремния), что, вероятно, обусловлено большей скоростью распада пересыщенных твердых растворов α - и β -фаз для рассматриваемого режима старения (нагрев до 570°C, выдержка 5 ч, охлаждение на воздухе). Средние значения твердости материала поковки плавки 0 с химическим составом, близким к номинальному, в интервале температур старения 570–650°C практически не изменяются, что свидетельствует о более стабильном состоянии материала (по сравнению с температурами старения 530–550°C). С повышением температуры второй ступени отжига до 700°C твердость материала падает (рис. 6), что обусловлено коагуляцией микродисперсных частиц третичной α -фазы (области с третичной α -фазой выделены на рис. 7, а) и силицидов титана, а также повышением стабильности твердых растворов α - и β -фаз (рис. 7, б).

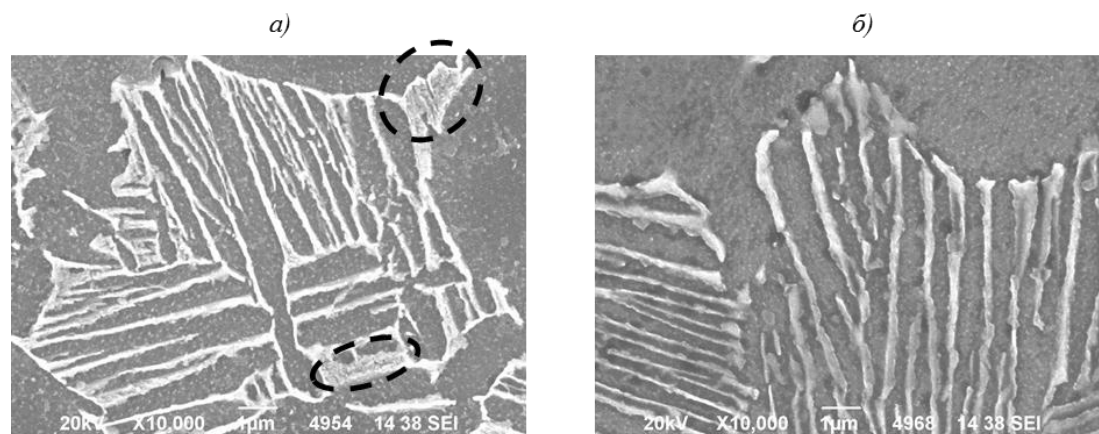


Рис. 7. Микроструктура поковки плавки 0 после двойного отжига при температуре второй ступени 570 (а) и 700°C (б)

Снижение содержания одного из легирующих элементов в сплаве в исследуемом диапазоне легирования приводит к снижению уровня кратковременной прочности при комнатной температуре в среднем на 30–40 МПа (табл. 2). Минимальный уровень кратковременной прочности зафиксирован на материале плавки 2 с минимальным содержанием железа. Изменение содержания железа на 0,05% (по массе) в сравнении с плавкой 0 приводит к заметному снижению характеристик прочности. В пересчете на структурный эквивалент по молибдену [12, 13] различие в суммарном содержании β -стабилизаторов для плавов 2 и 0 составило 0,5% (табл. 4).

Таблица 4

Уровень легирования плавов сплава ВТ46, выраженный в структурных эквивалентах по алюминию и молибдену

Условный номер плавки (см. табл. 1)	[Al] _{ЭКВ} , %	[Mo] _{ЭКВ} , %	Si, % (по массе)
0	8,28	3,38	0,28
1 (минимум Al)	7,03	3,16	0,22
2 (минимум Fe)	7,43	2,86	0,23
3 (минимум Sn)	7,53	3,21	0,22
4 (минимум Si)	8,08	3,25	0,15
Серийный сплав ВТ20 (среднее значение по результатам контрольных испытаний промышленных плавов)	8,05	3,27	–

Вместе со снижением уровня прочности сплава ВТ46 при комнатной температуре испытаний для плавков с пониженным содержанием одного из легирующих элементов, происходит повышение характеристик пластичности (по относительному удлинению – в среднем на 3–5,5%). Содержание олова практически не оказывает влияния на ударную вязкость, а снижение содержания кремния (с 0,28 до 0,15%) или алюминия (на 1%) приводит к увеличению ударной вязкости KCU – на ~80 кДж/м².

При температуре испытаний 500°C кратковременная прочность материала всех плавков с пониженным содержанием легирующих элементов (за исключением плавки 2 с минимальным содержанием железа) снижается в среднем на 55–70 МПа. С повышением температуры испытаний до 550°C различие в значениях прочности материалов плавков 1–4 с материалом плавки 0 составляет ~30 МПа.

Результаты испытаний на длительную прочность (табл. 3) показали, что снижение содержания алюминия, олова и кремния в сплаве ВТ46 приводит к снижению долговечности при испытаниях на длительную прочность при температуре 550°C. При температуре испытаний 500°C длительная прочность сплава ВТ46 в большей степени определяется уровнем кратковременной прочности материала, что подтверждается другими исследованиями [14].

Заключение

Проведенное исследование структуры и механических свойств опытных деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ46 с различным химическим составом показало, что снижение содержания основных легирующих элементов (алюминий, олово, кремний), определяющих жаропрочность титановых сплавов, в исследованных в работе пределах в большей степени снижают уровень кратковременной прочности в интервале рабочих температур. Долговечность образцов (длительная прочность) при температуре 500°C для базы испытаний ≥ 100 ч изменяется незначительно, а при 550°C – несколько снижается. Как и в случае сплава ВТ41 [15, 16], железо оказывает значительное влияние на уровень прочностных характеристик сплава ВТ46 при комнатной температуре испытаний. С учетом ранее проведенных исследований [14] построена зависимость величины кратковременной прочности от содержания железа в сплаве ВТ46 (рис. 8). Железо как наиболее «сильный» β -стабилизатор, широко применяемый в промышленных титановых сплавах, способствует образованию третичного распада при низкотемпературном отжиге сплава ВТ46, что обеспечивает повышение уровня дисперсионного упрочнения материала.

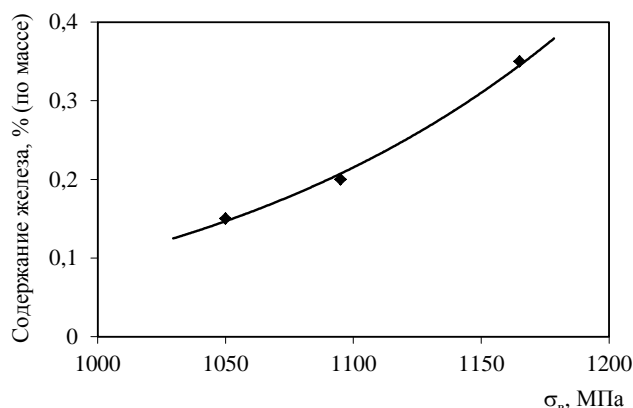


Рис. 8. Влияние содержания железа на кратковременную прочность при 20°C поковок из сплава ВТ46 с глобулярно-пластинчатой микроструктурой

Новый высокопрочный жаропрочный сплав ВТ46 при «ослабленном» химическом составе обеспечивает более высокий уровень прочности (на 50–100 МПа) и жаропрочности при температурах 500–550°C (более чем на 50 МПа) по сравнению с серийным сплавом ВТ20. Преимущества по прочностным характеристикам сплава ВТ46 номинального состава

ва составляют при комнатной температуре испытаний 85 МПа и 140–165 МПа – при повышенных температурах. Необходимо отметить, что исследованные в работе слитки изготавливались из чистого сырья – содержание в металле газовых примесей (кислорода и азота), а также углерода находилось на минимальном уровне. Применение углеродсодержащих лигатур, использование более твердой титановой губки и введение отходов при промышленном производстве слитков из сплава ВТ46 позволят дополнительно повысить уровень прочности материала при комнатной температуре на 20–60 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

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. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок // *Крылья Родины*. 2010. №4. С. 31–33.
4. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №S1. С. 3–9.
5. Орлов М.Р. Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИАМ» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №S. С. 387–393.
6. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. *Металловедение титана и его сплавов*. М.: *Металлургия*, 1992. 352 с.
7. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Кондратьева А.Р., Калашников В.С. Возможности по расширению области применения сплава ВТ8-1 для дисков и рабочих колес компрессора // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2016. №3 (39). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-5-5.
8. Кашапов О.С., Павлова Т.В. Исследование влияния параметров структуры полуфабрикатов из сплава ВТ41 на механические свойства // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*, 2015. №2 (101). С. 138–145.
9. Савушкин А.Н., Кашапов О.С., Голынец С.А. Влияние скорости нагружения на механические свойства жаропрочных титановых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №3. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-4-4.
10. Калашников В.С., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р. Исследование сварных соединений сплава ВТ41, полученных методом ЭЛС // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 81–88. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S5-81-88.
11. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Ночовная Н.А. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей // *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2012. №5. С. 8–14.
12. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Ночовная Н.А., Беляев М.С. Современные титановые сплавы и технологии, применяемые для деталей и узлов ГТД // *Сб. тез. докл. науч.-технич. конгресса по двигателестроению «Двигатели–2012»*. М.: АССАД, 2012. С. 347–349.
13. Ilyin A., Kolachev B., Volodin V., Ryndenkov D. About the purposefulness of comprasion of titanium alloys in terms of aluminium and Molybdenium equivalents // *Titanium 99. Science and technology*. 1999. P. 53–60.
14. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Повышение прочностных характеристик жаропрочных псевдо- α -титановых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S5. С. 73–80. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S5-73-80.
15. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Влияние содержания железа на механические свойства поковок из жаропрочного титанового сплава ВТ41 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-1-1.
16. Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Влияние содержания железа на механические свойства прутков из жаропрочного титанового сплава ВТ41 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн*. 2015. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.07.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-2-2.