

УДК 669.018.44:669.295

Т.В. Павлова¹, О.С. Кашанов¹, А.Р. Кондратьева¹, В.С. Калашиников¹**ВОЗМОЖНОСТИ ПО РАСШИРЕНИЮ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПЛАВА VT8-1 ДЛЯ ДИСКОВ И РАБОЧИХ КОЛЕС КОМПРЕССОРА**

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-5-5

Приведены основные факторы, позволяющие расширить область применения сплава VT8-1 для роторных деталей ГТД – дисков и рабочих колес вентилятора, компрессоров низкого и высокого давления. Приведены сравнительные характеристики механических свойств (кратковременной прочности, пластичности, вязкости разрушения, СРТУ) штамповок дисков из сплавов VT8-1 и VT6 применительно к крупногабаритным штамповкам дисков для вентилятора и первой ступени КНД, а также дисков КВД из сплавов VT8-1 и VT9 (характеристики кратковременной прочности, вязкости разрушения, СРТУ, жаропрочности) применительно к деталям с рабочей температурой до 500°C.

Ключевые слова: жаропрочные титановые сплавы, механические свойства, структура, диски компрессора.

The article describes main factors allowing to extend the application area for VT8-1 alloy in GTE parts for rotary – fan drives and compressors of high and low pressure. Comparative characteristics of the mechanical properties (strength, ductility, toughness, FCGR) of disks die forgings of VT8-1 and VT6 alloys with respect to large-sized forgings drives for the fan and first stage of low pressure compressors, as well as drives of the HPC of VT8-1 and VT9 alloys (characteristics of strength, fracture toughness, FCGR, heat resistance) applicable for parts with working temperature up to 500°C are presented.

Keywords: heat-resistance titanium alloys, mechanical properties, structure, compressor disks.

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

Номенклатура титановых сплавов, применяемых в отечественной промышленности для дисков газотурбинных двигателей, представлена восемью марками титановых сплавов с рабочей температурой до 350–600°C. При этом для дисков первой ступени компрессора (вентилятора) и компрессора низкого давления в ГТД 3–4 поколения применяются сплавы трех марок – VT3-1, VT6, VT8, для модификаций серийных и при разработке новых ГТД рекомендуется применять сплавы VT6 и VT8-1. Для рабочих температур свыше 450 до 500°C ранее применялись сплавы VT8, VT9 и VT25, в настоящее время рекомендуется их замена на сплав VT25У в интервале температур 500–550°C. В последнее время проведены работы по совершенствованию технологии изготовления полуфабрикатов из сплава VT8-1 – модификации сплава VT8 с аналогичной областью применения [1]. Проведенные исследования показали, что, с одной стороны, сплав VT8-1 обладает более высокой технологичностью в металлургическом производстве (на операциях горячей деформации), более высокими характеристиками прочности и трещиностойкости по сравнению со сплавом VT6 при изготовлении крупногабаритных штамповок (поковок) для дисков вентилятора, а с другой – обеспечивает более высокие характеристики жаропрочности при температуре 500°C в сравнении со штамповками дисков из сплава VT9. Это позволяет рассмотреть возможность унификации роторов

компрессора по применяемым титановым сплавам, обеспечить более высокие удельные характеристики изделия и снизить его себестоимость. Для обоснования сказанного далее приведены сравнительные характеристики сплавов ВТ8-1, ВТ6 и ВТ9 в интервале рабочих температур.

Материалы и методы

Механические свойства определяли на промышленных штамповках и поковках дисков, изготовленных в условиях ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» в соответствии с требованиями ОСТ 1 90197 «Поковки дисков и валов кованые и штампованные из титановых сплавов. Общие технические требования».

Гарантированные значения прочностных характеристик при комнатной температуре в соответствии с техническими условиями на поставку полуфабрикатов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Гарантированные значения прочностных характеристик при комнатной температуре

Сплав	Масса поковки, кг	σ_b , МПа	δ	ψ	КСУ	КСТ
			%		Дж/см ²	
ВТ8-1	До 50	980	10	25	35	13
	Свыше 100 до 200	960	9	25	35	13
	Свыше 200 до 500	940	8	22	35	13
ВТ6	До 100	930	10	25	40	15
	Свыше 100 до 200	900	9	25	40	15
ВТ9	До 50	1030	8	22	30	8

Результаты и обсуждение

Для сравнительной оценки прочностных характеристик крупногабаритных штамповок дисков из сплавов ВТ6 и ВТ8-1 приведем диапазон изменения значений (табл. 2).

Таблица 2

Прочностные характеристики крупногабаритных штамповок дисков из сплавов ВТ6 и ВТ8-1

Сплав	Полуфабрикат (состояние)	σ_b , МПа	δ	ψ	КСУ	КСТ
			%		Дж/см ²	
ВТ8-1	Поковка штампованная массой ~480 кг с максимальным сечением ~300 мм (отожженное)	995–1030	14,5–19,5	25–40	43–53	15–19,5
ВТ6	Поковки, штамповки дисков вентилятора и 1 ступени КНД массой до 100 кг (отожженное)	935–1045	10–17,5	28,5–52,5	41–62	17–38
	Поковка штампованная массой 317 кг с максимальным сечением 145 мм (охлаждение в воде+отжиг)	960–1060	13–16,5	26–49,5	41–50	20–23,5

Видно, что при изготовлении крупногабаритных штамповок дисков из сплава ВТ6 прочностные характеристики материала имеют значительную дисперсию, причем в центральных зонах штамповок прочность материала может снижаться на 90–100 МПа независимо от режима термической обработки. На более крупной штамповке диска вентилятора из сплава ВТ8-1 в отожженном состоянии обеспечиваются стабильно

высокие характеристики прочности, пластичности, ударной вязкости при сохранении достаточно высоких значений удельной работы разрушения образцов с трещиной.

Сравнительные характеристики усталостной прочности и трещиностойкости штамповок дисков из сплавов ВТ6 и ВТ8-1 приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

Характеристики усталостной прочности штамповок дисков из сплавов ВТ6 и ВТ8-1

Материал штамповки диска	МЦУ: σ_{\max} , МПа (при $N=10^4$ цикл), образцов		МнЦУ: σ_{\max} , МПа (при $N=2 \cdot 10^7$ цикл), образцов	
	гладких	с надрезом ($\alpha_\sigma=3,35$)	гладких	с надрезом ($\alpha_\sigma=2,33$)
ВТ8-1	1000	490	480–500*	220
ВТ6	900	450	480	220

* При термической обработке по скорректированному режиму отжига [5].

Материал штамповок дисков из сплава ВТ8-1 обладает большей малоцикловой усталостью по сравнению со сплавом ВТ6, что объясняется большей прочностью сплава ВТ8-1.

Таблица 4

Характеристики трещиностойкости штамповок дисков (отожженное состояние) из сплавов ВТ6 и ВТ8-1

Материал штамповки диска	K_{Ic} , МПа $\sqrt{м}$ (радиальное/тангенциальное направление вырезки образца)	СРТУ: dI/dN , мм/цикл, при размахе коэффициента интенсивности напряжения ΔK , МПа $\sqrt{м}$		
		21	31	41
ВТ8-1	85/98	$0,17 \cdot 10^{-6}$	$0,46 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
ВТ6	77/93	$0,15 \cdot 10^{-6}$	$0,82 \cdot 10^{-6}$	–

Жаропрочный титановый сплав ВТ8-1 по сравнению со сплавом ВТ6 обладает высоким уровнем вязкости разрушения и трещиностойкостью, а также обеспечивает стабильный рост трещины при больших значениях размаха коэффициента интенсивности напряжений.

Типичная микроструктура штамповок дисков из сплавов ВТ6 и ВТ8-1 приведена на рис. 1 и 2.

Для деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ6 характерной является микроструктура с более крупными выделениями первичной и вторичной α -фазы. После закалки в воде сплава ВТ6 удается зафиксировать минимальное количество первичной α -фазы при максимальной дисперсности пластин вторичной α -фазы (рис. 1, а), однако в центральной зоне крупных штамповок дисков эффект от быстрого охлаждения в воде значительно снижается (рис. 1, б), что приводит к различию механических свойств в периферийных и центральных зонах. Для крупногабаритных штамповок дисков из сплава ВТ8-1 при охлаждении на воздухе морфология выделения α -фазы в зависимости от толщины сечения также может существенно изменяться (рис. 2). Однако даже при неблагоприятной структуре материала (рис. 2, в) прочностные характеристики и ударная вязкость при комнатной температуре остаются на высоком уровне ($\sigma_b=1010$ МПа, $\delta=16\%$, $\psi=32\%$, $KCU=41$ Дж/см², $KCT=20$ Дж/см²).

Влияние толщины сечения на скорость охлаждения штамповок дисков из титановых сплавов подробно описано специалистами компании Snecma в работе [2]

(рис. 3). Измерения фактических скоростей охлаждения штамповки с максимальной толщиной сечения 80 мм из титанового сплава ВТ8 при охлаждении на воздухе в условиях ВИАМ показали практически идентичные результаты.

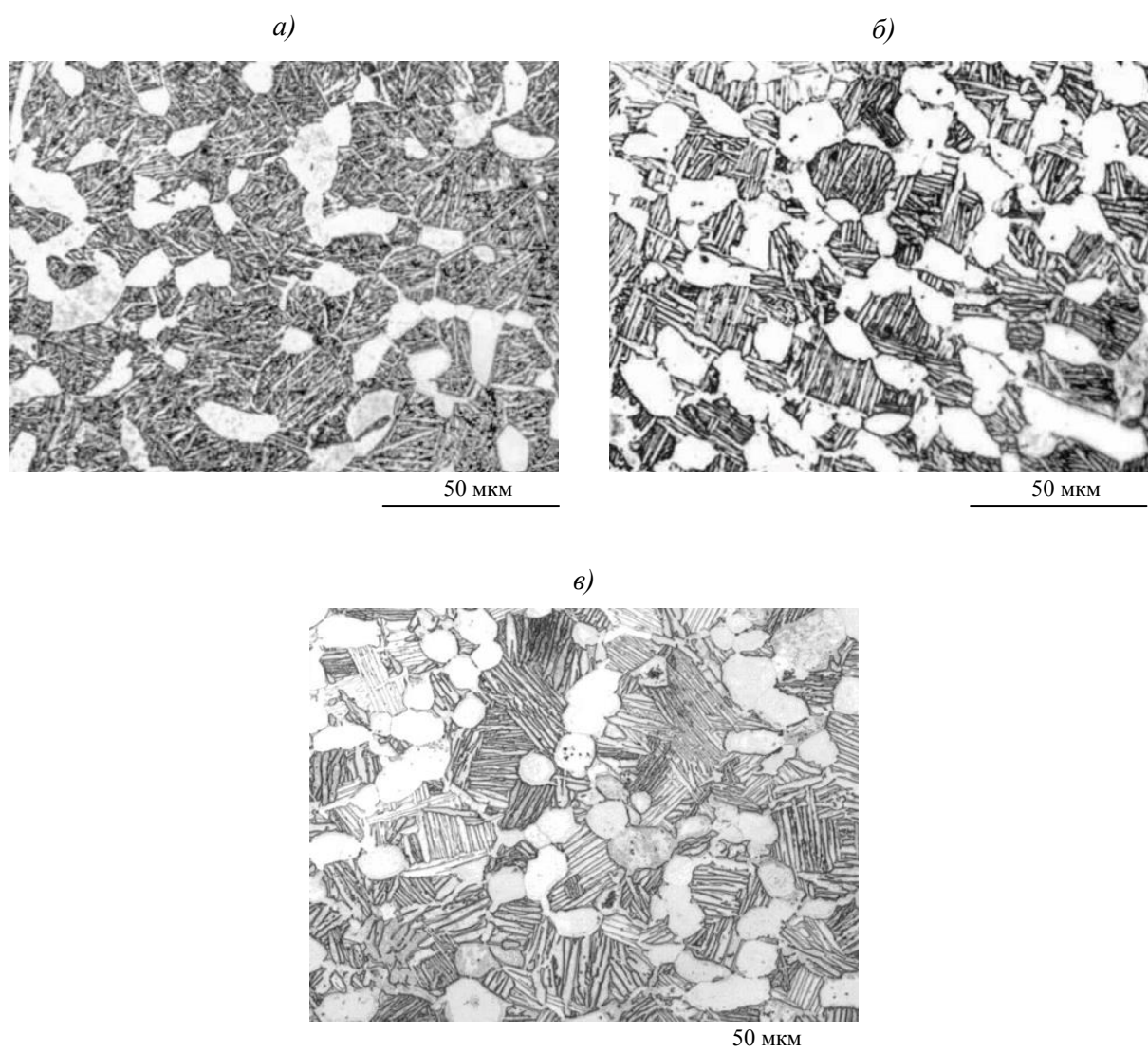


Рис. 1. Микроструктура штамповок дисков из сплава ВТ6 (крупная штамповка после охлаждения в воде с последующим отжигом):

а – периферийная зона; *б* – центральная зона; *в* – типичная структура после отжига с охлаждением на воздухе

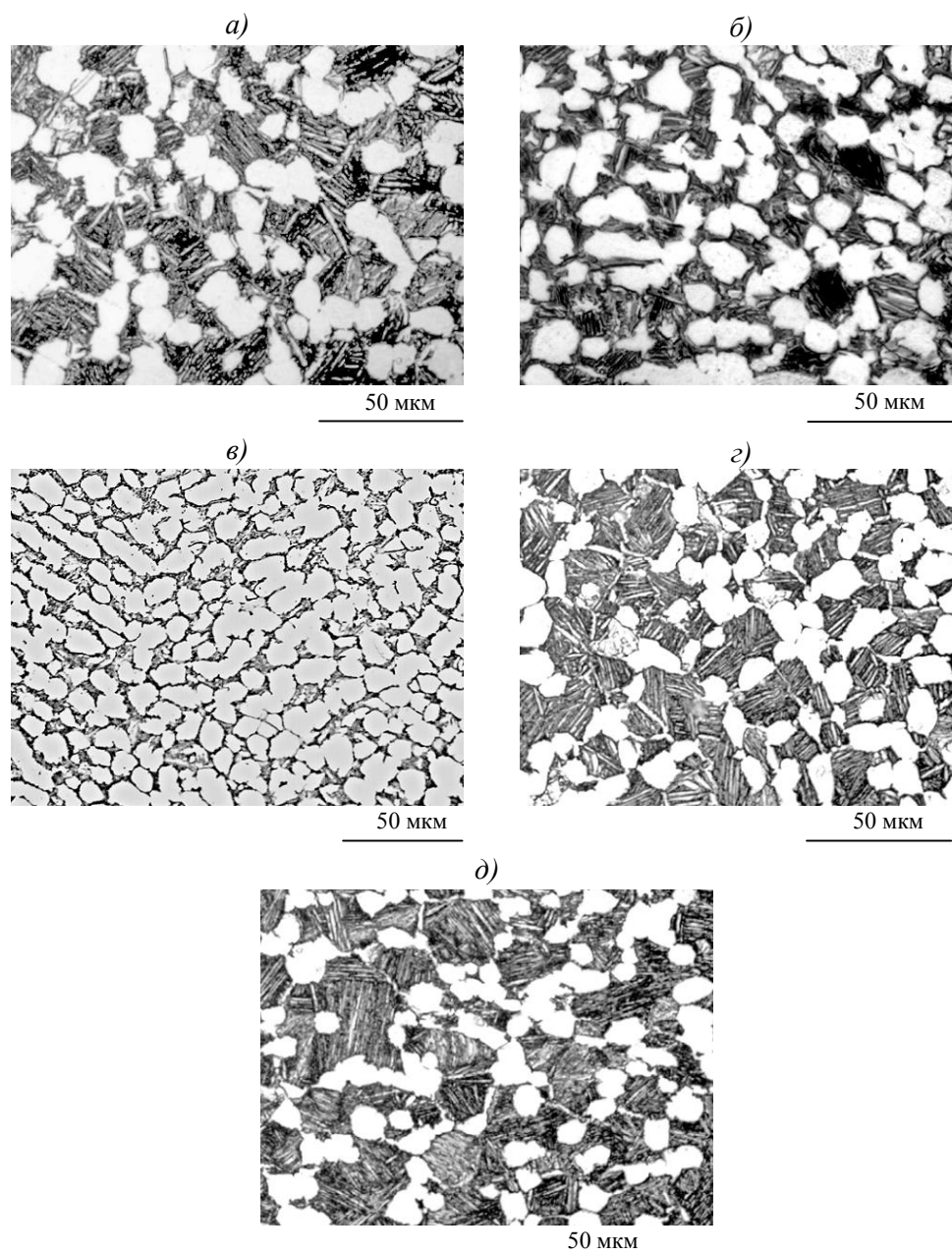


Рис. 2. Микроструктура крупных штамповок дисков из сплава ВТ8-1 после отжига при температурах первой ступени отжига $T_{п.п}$ -(20–30)°С, охлаждение на воздухе:
a, б – типичная на периферии и в центральной зоне; *в* – нетипичная в центральной зоне после отжига штамповки при температуре $T_{п.п}$ -40°С на первой ступени (штамповки дисков КНД и КВД); *г* – типичная для штамповки диска КНД; *д* – типичная для штамповки рабочего колеса при температуре отжига $T_{п.п}$ -25°С

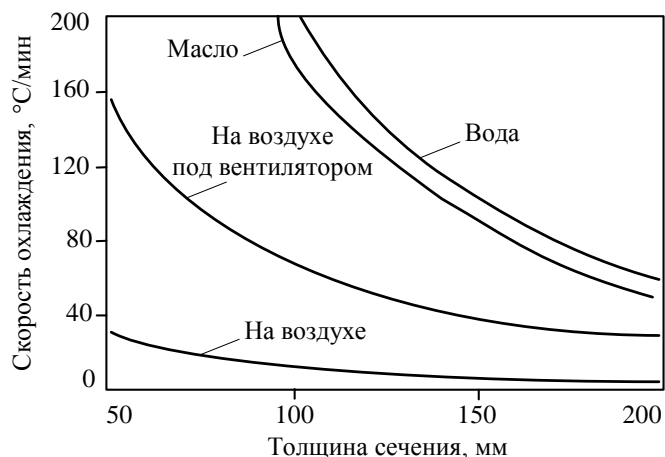


Рис. 3. Изменение фактической скорости охлаждения жаропрочных титановых сплавов в зависимости от величины сечения [2]

Для получения регламентированной глобулярно-пластинчатой структуры в крупных полуфабрикатах из сплава ВТ8-1 целесообразно проводить предварительную механическую обработку для получения минимальной толщины сечения под термическую обработку, высокотемпературный отжиг при температурах не менее $T_{п.п.} - 30^{\circ}\text{C}$ с последующим охлаждением под вентилятором.

Приведенные сравнительные характеристики механических свойств материала штамповок дисков из сплавов ВТ8-1 и ВТ6 показывают, что сплав ВТ8-1 в отожженном состоянии обеспечивает стабильно высокие значения прочностных и усталостных характеристик при больших сечениях штамповок, высокую вязкость разрушения и трещиностойкость, что позволяет рекомендовать его для замены других серийных сплавов, включая сплав ВТ6 [3].

Рассмотрим возможности применения сплава ВТ8-1 (взамен сплава ВТ9) для дисков КВД с рабочей температурой до 500°C . Отметим, что к основным достоинствам сплава ВТ9 можно отнести более высокий уровень кратковременной прочности и многоциклового усталости при комнатной температуре испытаний, при этом характеристики трещиностойкости у сплава ВТ9 существенно ниже, чем у сплавов ВТ6, ВТ8 и др. На рис. 4 приведены зависимости изменения характеристик механических свойств при растяжении от температуры испытаний, на рис. 5 и 6 — характеристики длительной прочности и ползучести.

Видно, что кратковременная прочность сплава ВТ9 до температуры 450°C включительно выше кратковременной прочности сплава ВТ8-1 на $\sim 20\text{--}40$ МПа при более высоких характеристиках пластичности во всем интервале температур испытаний. При температуре 500°C прочность сплавов одинакова, а при температуре испытания 550°C прочность сплава ВТ8-1 несколько выше прочности сплава ВТ9. Кроме того, по всем жаропрочным характеристикам при температурах 450 и 500°C сплав ВТ8-1 также имеет преимущество перед сплавом ВТ9.

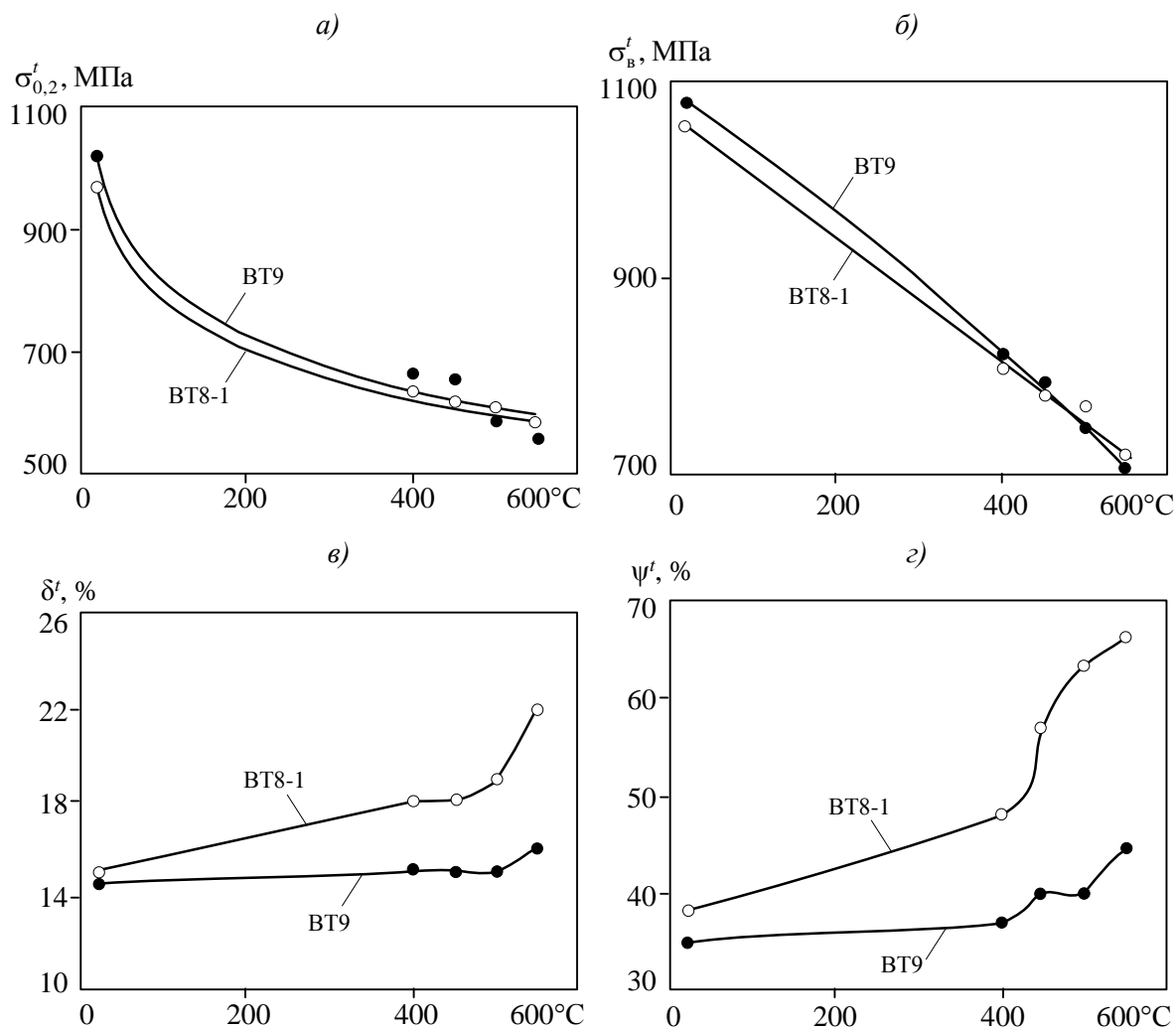


Рис. 4. Условный предел текучести (а), предел прочности (б), относительные удлинение (в) и сужение (г) материала штамповок дисков из сплавов ВТ8-1 и ВТ9 (средние значения) в зависимости от температуры испытаний

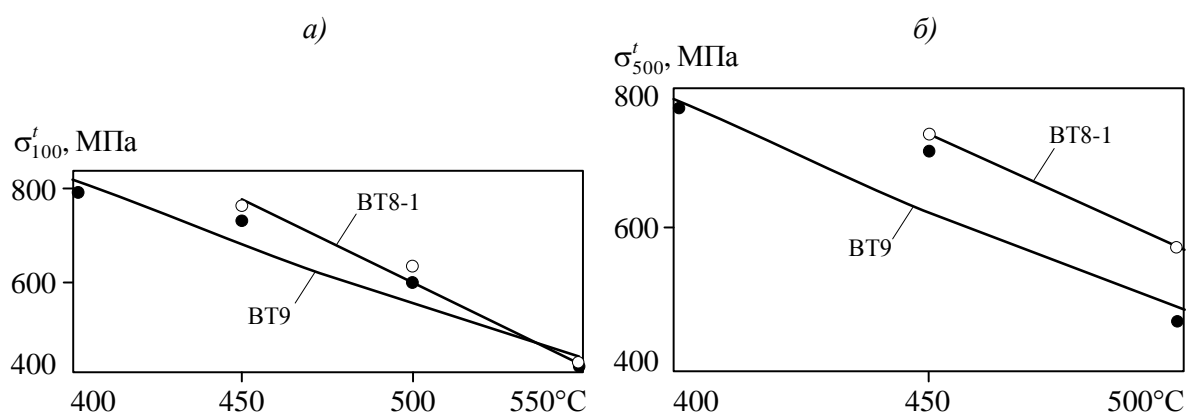


Рис. 5. Длительная прочность за 100 (а) и 500 ч (б) материала штамповок дисков из сплавов ВТ8-1 и ВТ9 в зависимости от температуры испытаний

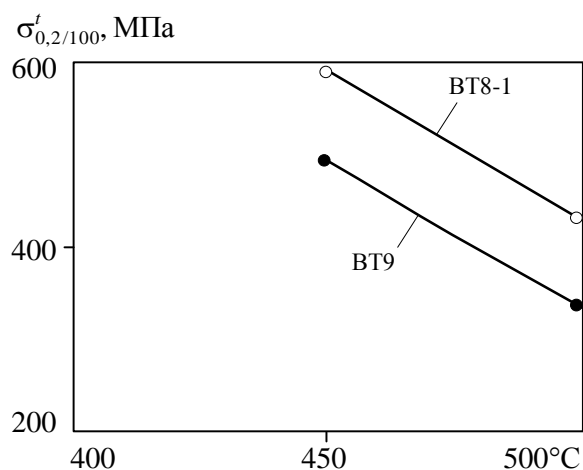


Рис. 6. Сопротивление ползучести за 100 ч при остаточной деформации 0,2% материала штамповок дисков из сплавов ВТ8-1 и ВТ9 в зависимости от температуры испытаний

Характеристики ударной вязкости, трещиностойкости и вязкости разрушения материала штамповок дисков из сплавов ВТ8-1 и ВТ9 приведены в табл. 5.

Таблица 5

**Механические характеристики штамповок диска (отожженное состояние)
из сплавов ВТ9 и ВТ8-1**

Материал штамповки диска	<i>KCU</i>	<i>KCT</i>	<i>K_{1c}</i> , МПа√м (радиальное/тангенциальное направление вырезки образца)	СРТУ: <i>dl/dN</i> , мм/цикл (при $\Delta K=31$ МПа√м)
	Дж/см ²			
ВТ8-1	52	22	85/98	$0,46 \cdot 10^{-6}$
ВТ9	41	12	58/71	$2,8 \cdot 10^{-6}$

Сплав ВТ8-1 обладает значительно большими характеристиками ударной вязкости и трещиностойкости по сравнению со сплавом ВТ9. Кроме того, существует возможность повышения минимальных прочностных характеристик на штамповках дисков из сплава ВТ8-1 за счет оптимизации технологии термомеханической и термической обработки при сохранении высоких показателей трещиностойкости. В качестве примера можно привести опытные работы по изготовлению штамповок рабочих колес типа «блиск» из сплава ВТ8-1 [4]. Подобные возможности обеспечиваются как композицией самого сплава, так и получением регламентированной глобулярно-пластинчатой структуры в материале. По сравнению с жаропрочными сплавами ВТ3-1, ВТ8, ВТ9, сплав ВТ8-1 содержит меньшее количество легирующих элементов (алюминий, кремний), снижающих вязкость материала. Повышению прочностных характеристик способствуют небольшие добавки таких элементов, как нейтральные упрочнители (олово и цирконий), которые повышают уровень твердорастворного упрочнения α - и β -фаз. Необходимо отметить, что работы по совершенствованию промышленных титановых сплавов зачастую носят прикладной и фундаментальный характер, так как при проведении исследований фазового и химического состава фаз более подробно исследуются процессы фазовых превращений в многокомпонентных системах [5–15]. Так, для сплава ВТ8-1 получены предварительные данные, позволяющие качественно и количественно описать величину упрочнения различных α -твердых растворов первичной и вторичной α -фазы, а также α -оторочки условного β -зерна в глобулярно-пластинчатой структуре [4]. Получение новых данных по качественному и количественному описа-

нию структуры материала позволит прогнозировать его свойства, проводить оптимизацию химического состава, а также разрабатывать новые композиции сплавов с улучшенными характеристиками.

Заключение

Работы по совершенствованию технологии изготовления промышленных штамповок дисков из сплава ВТ8-1, проводимые во ФГУП «ВИАМ» и ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА», позволили раскрыть потенциал сплава, одновременно повышая прочностные и жаропрочные свойства, а также выносливость и длительную прочность, при сохранении максимальных характеристик вязкости и трещиностойкости, что особенно важно для новых высокоресурсных двигателей V поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов для деталей ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч. технич. журн. 2013. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.07.2015).
2. Barussad A., Desvalles Y., Guedou J.Y. Control of the microstructure in large titanium discs. Application to the high pressure compressor of the GE90 aeroengine / In: Titanium-95: Science and Technology. UK. The institute of Materials. 1996. P. 1599-1608.
3. Кривцов В.С., Павленко В.Н., Волков И.В. Оценка влияния ряда факторов на сопротивление усталости титановых сплавов // Проблемы машиностроения. 2011. Т.14. № 6. С. 37-41.
4. Истракова А.Р., Кашапов О.С., Калашников В.С. Исследование влияния режимов отжига на структуру и фазовый состав штамповок моноколес из сплава ВТ8-1 // Вестник МАИ. 2015. №2. С. 142-151.
5. Способ термической обработки высокопрочных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов: пат. 2465366 Рос. Федерация; опубл. 15.09.11.
6. Способ термомеханической обработки изделий из титановых сплавов: пат. 2457273 Рос. Федерация; опубл. 05.04.11.
7. Хорев А.И. Теоретические и практические основы повышения конструкционной прочности современных титановых сплавов // Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 144-153.
8. Хорев А.И. Разработка конструкционных титановых сплавов для изготовления деталей и узлов авиакосмической техники // Сварочное производство. 2009. №3. С. 13-23.
9. 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.
10. Каблов Е.Н. Шестой технологический уклад // Наука и жизнь. 2010. №4. С. 2-7.
11. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ электрон. науч. технич. журн. 2013. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.07.2015).
12. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3-9.
13. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. Металловедение титана и его сплавов. М.: Металлургия, 1992. 352 с.
14. Малышева С.П., Мурзинова М.А., Жеребцов С.В., Салищев Г.А. Механические свойства ультрамелкозернистого титанового сплава ВТ6 // Перспективные материалы. 2011. №12. С. 316-320.
15. Попов А.А., Демаков С.Л., Попова М.А., Россина Н.Г., Елкина О.А. Выделение частиц силицидов в жаропрочных титановых сплавах // Титан. 2013. №1 (39). С. 4-13.