

## Титановые сплавы в центробежных компрессорах

Е.Н. Поморцев, В.И. Чигарин, З.Р. Габдрахманова

(ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС)

Рассмотрены основные сведения по металловедению титановых сплавов. Установлено влияние температурных режимов термообработки на структуру сплава BT6С. Отражены исследуемые режимы пайки рабочих колес. Рекомендована технология пайки порошковым припоем.

**Ключевые слова:** титановый сплав BT6С, полиморфное превращение, пайка, микроструктура

**Application of Titanium Alloys in Centrifugal Compressors**

**E.N. Pomortsev, V.I. Chigarin, Z.R. Gabdrakhmanova (CJSC «NIIturbocompressor named after V.B. Shneppe», HMS Group)**

The basic information regarding to the metallurgy of titanium alloys has been considered. The influence of temperature treatment on the structure of the VT6S alloy has been established. Impellers' brazing data under investigation have been reflected. Method for brazing using powder-brazing alloy has been recommended.

**Keywords:** VT6S titanium alloy, polymorphic transformation, soldering, microstructure

ПРОДУКЦИЯ

Производство новых конструкций машин, оборудования и, в частности, компрессорного и турбохолодильного оборудования ставят вопрос о применении новых конструкционных материалов. Одним из таких материалов является титан и его сплавы. Уникальные свойства титановых сплавов открывают значительные возможности совершенствования как конструкции изделий, так и технологических процессов изготовления этих изделий.

Титан и его сплавы имеют два основных преимущества перед другими конструкционными металлами: высокую удельную прочность (прочность, отнесенную к удельному весу), существенно превышающую удельную прочность сталей и алюминиевых сплавов, и отличную коррозионную стойкость в самых суровых атмосферных условиях, а также в ряде сильных химических реагентов. В некоторых случаях немаловажное значение имеют и другие свойства титана, например, немагнитность, высокая температура плавления, малый коэффициент термического расширения, биологическая инертность и др. [1].

Указанные преимущества титановых сплавов обусловили их применение в ОАО «Казанькомпрессормаш» и ЗАО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» (Группа

ГМС). В группе ГМС использовали титановые сплавы при изготовлении ряда узлов, в частности, рабочих колес центробежных и турбодетандерных машин.

При изготовлении рабочего колеса закрытого типа основной диск (рис. 1) с предварительно сформированными лопatkами, полученными фрезерованием полостей, соединяется с покрывным диском. Среди многообразия способов соединения покрывного диска с лопatkами основного диска наиболее эффективным представляется сварка через полости в диске, а в случае невозможности последней – вакуумная пайка как надежный и высокопроизводительный технологический процесс.

Конечной целью исследования титана и процессов, протекающих при термической обработке являлась разработка новой технологии пайки рабочих колес.

Титан может существовать в двух кристаллических модификациях –  $\alpha$  и  $\beta$ . Низкотемпературная модификация  $\alpha$  имеет гексагональную решетку с плотной упаковкой атомов, высокотемпературная модификация  $\beta$  имеет объемно-центрированную кубическую решетку. При превращении  $\alpha \rightarrow \beta$  изменение объема составляет 5,5%. Это обстоятельство существенно влияет на паемость титана, возможность удаления его оксидной пленки и диффузию депрессантов из шва в паяемый металл. Элементы, образующие твердые растворы внедрения, относятся к вредным примесям (C, N, O, H), охрупчивающим титан.

Определяющее значение в большинстве процессов, протекающих при термической обработке титановых сплавов, в том числе пайки, имеет полиморфное превращение, поэтому действие легирующих элементов сплава характеризуется их влиянием на температуру полиморфного превращения. Элементы подразделяются на повышающие эту температуру ( $\alpha$ -стабилизаторы – алюминий) и понижающие ( $\beta$ -стабилизаторы – молибден, хром, ванадий, марганец, ниобий).

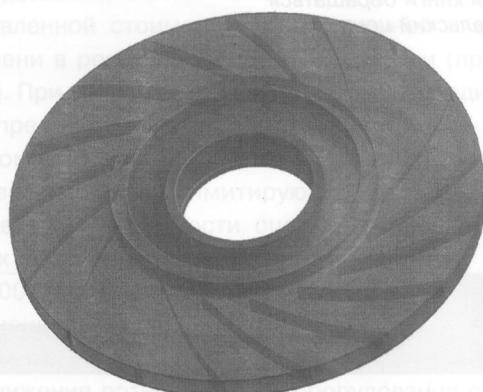


Рис. 1. Рабочее колесо центробежного компрессора

Номер образца	Режим термообработки			Механические свойства	
	Температура нагрева, °C	Время выдержки, мин	Охлаждение	$\sigma_b$ , МПа	HB
11103	600	120	Воздух	869	302
11103	950	40	Вода	868	306
11103	980	40	Вода	799	269
11106	600	120	Воздух	981	321
11106	950	40	Вода	963	329
11106	980	40	Вода	833	285
11107	600	120	Воздух	958	311
11107	950	40	Вода	928	321
11107	980	40	Вода	845	269

Сплав BT6C системы Ti-Al-V, применяемый для изготовления рабочих колес, относится к двухфазным ( $\alpha + \beta$ )-сплавам. Согласно справочным данным, температура полиморфного превращения сплава BT6C 950...990°C.

#### Химический состав сплава по ОСТ I 90013–81

Компоненты	Содержание, %
<b>Основные</b>	
Ti	Основа
Al	5,3...6,5
V	3,5...4,5
<b>Примеси</b>	
C	Не более 0,1
Fe	Не более 0,25
Si	Не более 0,1
Zr	Не более 0,3
O <sub>2</sub>	Не более 0,15
N <sub>2</sub>	Не более 0,05
H <sub>2</sub>	Не более 0,015
Сумма прочих	Не более 0,3

Механические свойства сплава по ОСТ 90000–70: при толщине заготовки до 100 мм – временное сопротивление  $\sigma_b = 834\ldots981$  МПа; относительное удлинение  $\delta = 10\%$ ; поперечное сужение  $\psi = 30\%$ ; ударная вязкость (KCU) = 4 кгс·м/см<sup>2</sup>; при толщине заготовки 101...250 мм – временное сопротивление  $\sigma_b = 755\ldots981$  МПа; относительное удлинение  $\delta = 6\%$ ; поперечное сужение  $\psi = 20\%$ ; ударная вязкость (KCU) = 4 кгс·м/см<sup>2</sup>.

Основной задачей первого направления исследования было выявление температуры полиморфного превращения сплава BT6C данного образца с целью корректировки режима пайки. Для этого из заготовки были изготовлены образцы №№ 4...10 для осуществления пробных закалок в воду с различных температур ( $T = 940\ldots1000$ °C) и образец №11 в исходном состоянии для

последующего микро- и макроисследования темплетов.

Вторым направлением была разработка технологии пайки порошковым припоем взамен технологии пайки ленточным припоем в связи со снятием с производства последней и исследование оптимального режима. С этой целью изготавливали образцы для пайки с имитационным нагревом на температуру пайки 950 и 980°C с последующим испытанием механических свойств. Параллельно велась разработка конструкции приспособления для подачи порошкового припоя в зазор.

Испытания стандартных образцов на определение механических свойств выполняли на универсальной разрывной машине FP100/1. Замер твердости производили на стационарном твердомере Бринелля (типа ТБ). Микроисследование структуры образцов проводили на микроскопах МИМ-6, МИМ-7, OLIMPUS BX-51 согласно инструкции ВИАМ.

#### Результаты исследования

Механические испытания проводились на образцах заготовок разных плавок сплава BT6C. Результаты измерения механических свойств образцов представлены в таблице.

#### Микроструктура образцов пробных закалок

Из заготовки №11103 были взяты образцы на металлографические исследования – №1...11. Макроструктура образцов № 4...11 пробных закалок представлена на рис. 2.

Образец №11 (в состоянии поставки). Микроструктура представлена пластинчатой ( $\alpha + \beta$ )-структурой, вытянутой в направлении деформации. Границы первичного  $\beta$ -зерна прерывистые. Внутризеренный объем расчленен  $\alpha$ -пластинами, собранными в  $\alpha$ -колонии. В пределах одной пачки  $\alpha$ -пластинны имеют одинаковую кристаллографическую ориентировку (рис. 3, а).



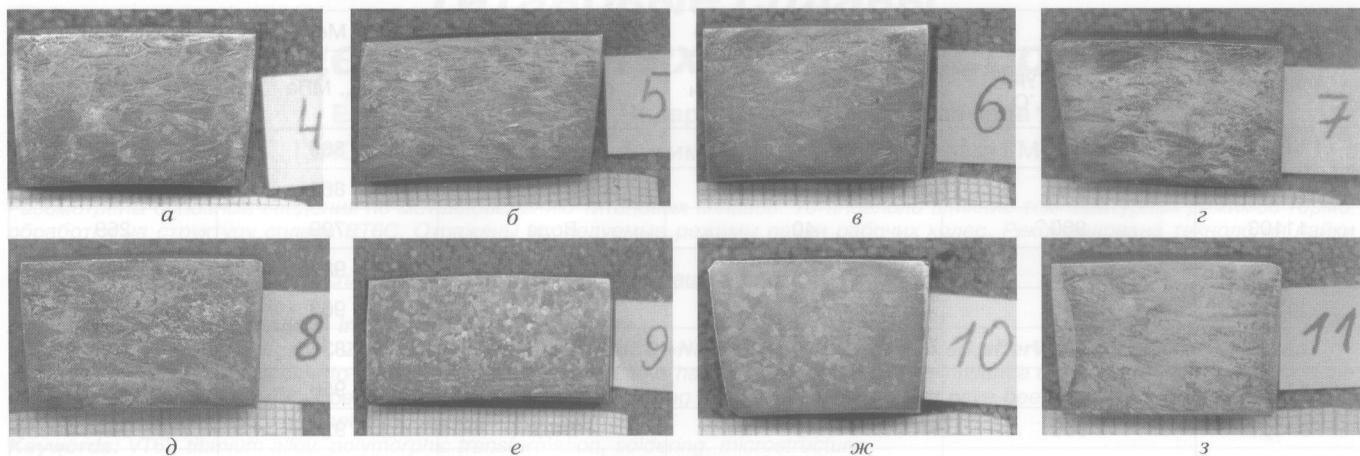


Рис. 2. Макроструктура образцов пробных закалок при разных температурах:  
а – 940°C; б – 950°C; в – 960°C; г – 970°C; д – 980°C; е – 990°C; ж – 1000°C; з – состояние поставки, отжиг 600°C

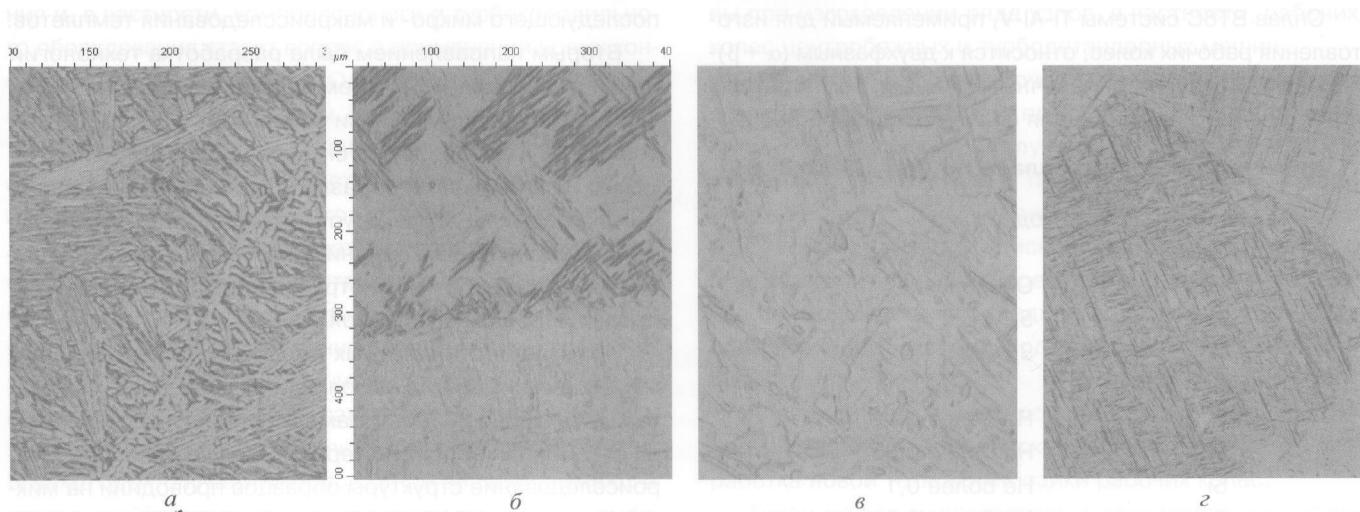


Рис. 3. Изменение структуры после охлаждения в воде с разных температур (увеличение  $\times 500$ ):  
а – образец №11 – исходная структура; б – образец №6 – нагрев 960°C, охлаждение в воде; в – образец №8 – нагрев 980°C, охлаждение в воде; г – образец №9 – нагрев 990°C, охлаждение в воде

Образцы №4...8. Температура нагрева 940...980°C, охлаждение в воде. С повышением температуры нагрева отмечается уменьшение количества первичной  $\alpha$ -фазы и появление игольчатых выделений внутри первичного  $\beta$ -зерна (рис. 3, б, в), что свидетельствует о структурных преобразованиях в металле.

Образцы №9 и №10. Температура нагрева 990 и 1000°C соответственно, охлаждение в воде. Структура представлена полиздрическими крупными зернами (границами первичной  $\beta$ -фазы) с игольчатым внутризеренным строением, что свидетельствует о закалке с температуры  $\beta$ -области (рис. 3, г).

#### **Микроструктура образцов после имитационных нагревов**

Образец №1 (нагрев при 950°C, 40 мин, охлаждение с печью). Микроструктура – пластинчатая ( $\alpha + \beta$ )-фаза

корзиночного плетения без видимых границ зерна, 3–4 типа шкалы ВИАМ (рис. 4 а, б).

Образец №2 (термообработка при 980°C, 40 мин, охлаждение с печью). Микроструктура крупнозернистая 4–6 тип шкалы ВИАМ с  $\alpha$ -оторочкой по границам  $\beta$ -зерен. Внутри зерна объем расчленен  $\alpha$ -пластинами разной ориентации (рис. 5, а, б, в).

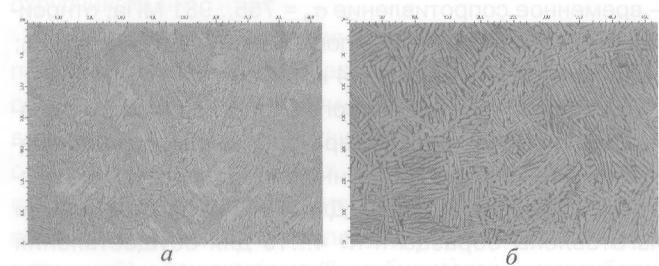


Рис. 4. Микроструктура образца №1 – нагрев 950°C, 40 мин, охлаждение с печью: а – увеличение  $\times 100$ ; б – увеличение  $\times 350$



Структура образцов №1, 2 по сравнению с исходной структурой образца №11 имеет равноосное строение. Образец №1 имеет структуру более удовлетворительную, чем образец №2, у которого после нагрева при 980°C отмечается более крупнозернистая структура с  $\alpha$ -оторочкой по границе зерна.

сплава данного химического состава составляет 985°C. В исследовании отмечается, что структурные преобразования происходят уже при температурах 950...960°C. Структурные изменения, возникшие в результате нагрева сплава до ТПП либо выше нее, являются необратимыми.

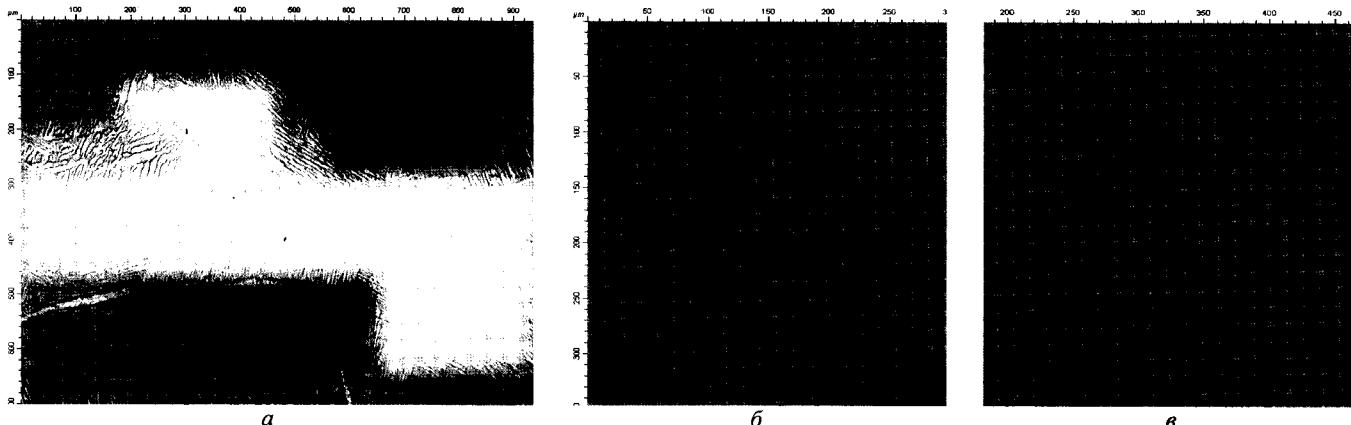


Рис. 5. Микроструктура образца №2, – нагрев 980°C, 40 мин, охлаждение с печью:  
а – увеличение  $\times 100$ ; б, в – увеличение  $\times 300$

Согласно инструкции, определение температуры полиморфного превращения (ТПП) пробных закалок допускается считать за ТПП температуру, при которой в структуре сплава остается 5%  $\alpha$ -фазы. Можно считать, что для данных образцов ТПП = 985°C. Дополнительное старение при температуре 550°C в течение 5 ч, проведенное при исследовании в лаборатории, повышения четкости структурных составляющих не дало.

По результатам исследования образцов из титанового сплава BT6C с имитационными нагревами до температуры 950 и 980°C установлено, что после нагрева до температуры 950°C металл имеет удовлетворительную структуру по сравнению с металлом, нагретым до 980°C, у которого отмечается крупнозернистая структура с  $\alpha$ -оторочкой по границам зерен. При анализе результатов пробных закалок установлено, что температура полного полиморфного превращения для

В исследовании отмечено понижение показателей предела прочности и твердости основного металла в результате нагревания до температуры 980°C относительно исходного состояния, в то же время существенных изменений механических свойств основы от нагревания до температуры 950°C не отмечено.

Пайку изделий из сплава BT6C производить в интервале ТПП нежелательно. Таким образом, рекомендуемая температура пайки деталей должна находиться в пределах 940...950°C

В процессе исследования разработана технология пайки рабочих колес из сплава BT6C порошковым припоем.

#### Список литературы

1. А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС-МАТИ. 2009.
2. И.Е. Петрунина. Справочник по пайке. М.: Машиностроение. 2003.

## KMН-НОВОСТИ

На компрессорной конференции Британского общества инженеров-механиков сотрудники лаборатории «Газовая динамика турбомашин» представили четыре доклада (сентябрь 2015 г., Лондон). Подведя итоги конференции, оргкомитет решил опубликовать по одному докладу с высоким рейтингом от 17 организаций-участников в журнале Британского общества инженеров-механиков Доклад Ю. Галеркина, А. Рекстона, К. Солдатовой, А. Дроздова занял 2-е место среди 118 докладов, представленных на конференции, и будет опубликован.

Кроме того, впервые российские компрессорщики приняли участие в Международной газотурбинной конференции ASME-India (декабрь 2015, г. Хайдерабад). Доклады, представленные сотрудниками лаборатории «Газовая динамика турбомашин», вызвали большой интерес и многочисленные вопросы со стороны зарубежных коллег, а специалисты из Индии, США и Германии проявили интерес к международным конференциям по компрессорной тематике, проводимым Ассоциацией.

