

Исследование микроструктуры и механических свойств компрессорных лопаток авиационного двигателя, изготовленных из титанового сплава с субмикроструктурной структурой.

Малышева С.П.

svufa@mail.ru

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Халтурина 39, 450001 Уфа

Методом изотермической штамповки изготовлена опытная партия лопаток из титанового сплава ВТ6 при температуре 650°C. Температура штамповки на 250-270°C ниже обычно применяемой при изготовлении лопаток из сплава ВТ6 по серийной технологии. По результатам проведенных исследований выбран режим термообработки лопаток после штамповки. Проведены исследования микроструктуры и механических свойств лопаток. Показано, что у лопаток с субмикроструктурной структурой прочность на 20%, а пластичность на 50% выше, чем у серийно выпускаемых лопаток из того же сплава.

Ключевые слова: титановый сплав ВТ6, лопатки, микроструктура, механические свойства, прочность, пластичность.

Investigation of the microstructure and mechanical properties of the aircraft engine compressor blades made from the titanium alloy with submicrocrystalline structure.

S.P. Malysheva

Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

The method of isothermal forging produced the lot of blades of titanium alloy VT6 at a temperature of 650°C. This temperature on 250-270°C below usually applied at the production of blades from the alloy of VT6. Picked up by thermal treatment of the blades. Research on the microstructure and mechanical properties of the blades. It is shown that in blades with a submicrocrystalline structure strength in 20% and ductility of 50% higher than the commercially produced blades of the same alloy.

Keywords: titanium alloy VT6, blades, microstructure, mechanical properties, strength, ductility.

1. Введение

В последнее время все большее внимание специалистов, занимающихся созданием и исследованием новых материалов, уделяется использованию субмикроструктурных (СМК) и нанокристаллических (НК) материалов, которые обладают уникальными физико-механическими свойствами (высокая прочность, сверхпластичность, высокая усталостная прочность, износостойкость и другие) [1-3]. СМК материалы рассматриваются как перспективные конструкционные и функциональные материалы, которые могут найти применение в таких приоритетных отраслях как авиационная промышленность, транспорт и энергетика, в частности для изготовления деталей авиационных двигателей и наземных газотурбинных установок.

Применение СМК и НК материалов для изготовления деталей авиационных двигателей имеет свои особенности, связанные с температурными условиями эк-

сплуатации. В узлах, где температура эксплуатации не выше 350°C, используются титановые сплавы, среди которых наиболее распространен двухфазный сплав ВТ6. В настоящей работе исследована возможность изготовления из титанового сплава ВТ6 с СМК структурой лопаток компрессора газотурбинного двигателя.

2. Материал и методики исследований.

В качестве исходных заготовок для лопаток использовались прутки из титанового сплава ВТ6 (Ti-6,5Al-5,1V) с СМК структурой длиной 140 мм диаметром 20 мм (рис.1а). Прутки были получены всесторонней изотермической ковкой (ВИК) [4] в интервале температур 800-630°C со скоростью деформации 10^{-3}с^{-1} и последующей протяжкой при температуре 630-650°C. Из прутков в условиях реального производства изготовлена партия лопаток методом изотермической штамповки (ИЗШ) при температуре 650°C (рис.1б). Данная температура



Рис. 1. Внешний вид полуфабрикатов (а-исходный пруток; б-лопатка, полученная ИЗШ; в-лопатка после механической обработки).

на 260°C ниже обычно применяемой при производстве этого типа лопаток. Однако в процессе изготовления лопаток обнаружился ряд технологических проблем: во-первых, серийно используемая для штамповки такого типа лопаток смазка, работающая при $T \geq 850^\circ\text{C}$, оказалась непригодна для штамповки при пониженной температуре; во-вторых, усилие используемого пресса оказалось недостаточным для качественного формообразования изделия. Подбор новой смазки и штамповка в два этапа позволила решить отмеченные проблемы. В дальнейшем рекомендовано перед штамповкой проводить электровысадку прутка для набора материала под замковую часть лопатки. Такой прием должен помочь уменьшить до одного количество переходов штамповки лопаток при температуре 650°C.

Далее следовала механическая обработка лопаток (рис.1в) и отжиг для снятия внутренних напряжений.

Температура отжига подбиралась экспериментально, для этого проводили отжиг в интервале температур 450-650°C с шагом 50°C в течение 1 часа. Для отжига использовалась индукционная печь КС400.

Микроструктура образцов исследовалась с помощью оптического микроскопа «Axiovert-100A» и просвечивающего электронного микроскопа JEM-2000EX. Размер зерен оценивался по темнопольным изображениям. Механические свойства лопаток определяли испытаниями цилиндрических образцов на растяжение на испытательной машине Инстрон при комнатной температуре. Образцы с размерами рабочей части $\varnothing 3 \times 18$ (мм) выре-

зались из лопаток. Измерение микротвердости осуществляли на приборе ПМТ-3М.

Все полученные данные сравнивали с результатами, полученными на образцах, вырезанных из лопаток, изготовленных по серийной технологии. Серийные лопатки штампуются на этом же оборудовании в изотермических условиях, но при температуре 910°C, за один переход, далее следует обрезка облоя с нагревом до 900°C, изотермическая калибровка при 880°C и отжиг 530°C 1 час.

3. Результаты и обсуждение

На рис.2а представлена микроструктура исходного прутка под штамповку из титанового сплава ВТ6. Видно, что микроструктура прутка однородная, микрофрагменты и зерна равноосной формы, границы зерен нечеткие, средний размер структурных составляющих 0,5 мкм. В образце имеются значительные внутренние напряжения. Кольцевой вид электронограммы свидетельствует о значительном измельчении микроструктуры.

На рис.2б приведена микроструктура полуфабриката лопатки после ИЗШ при 650°C. Микроструктура аналогична микроструктуре исходного прутка, размер зерен и микрофрагментов не изменился. В полуфабрикате имеются внутренние напряжения, которые могут привести к короблению лопатки в процессе механической обработки. Для снятия остаточных напряжений проводили отжиг. Температуру отжига подбирали эксперименталь-

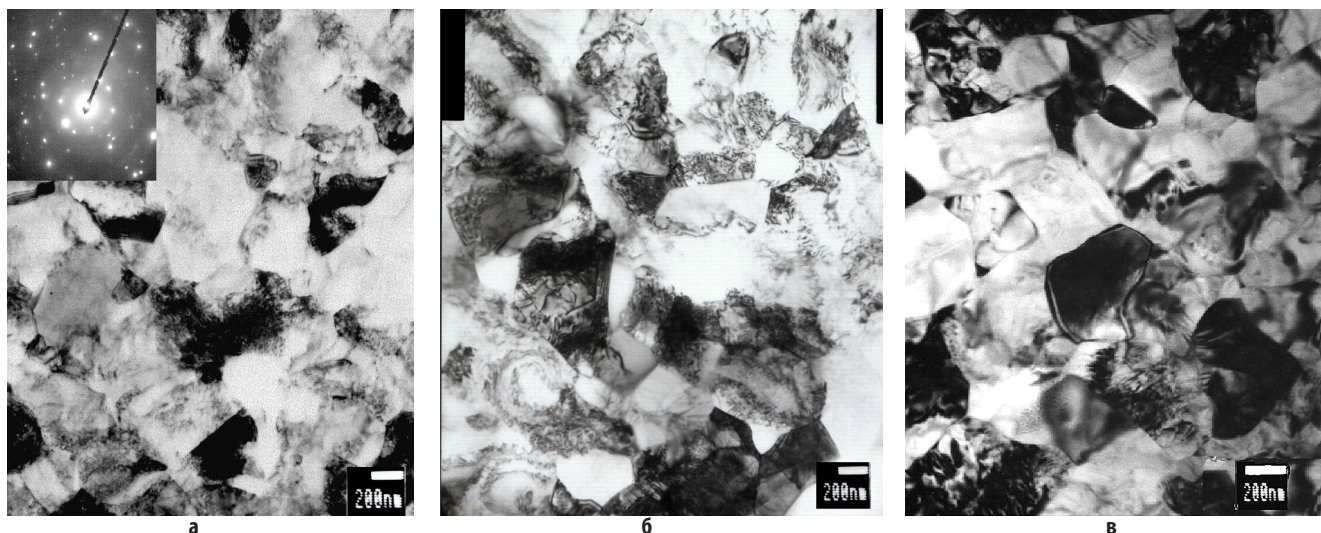


Рис. 2. Микроструктура сплава ВТ6 (а - исходный пруток, б - лопатка после ИЗШ, в - лопатка после отжига при $T = 620^\circ\text{C}$).

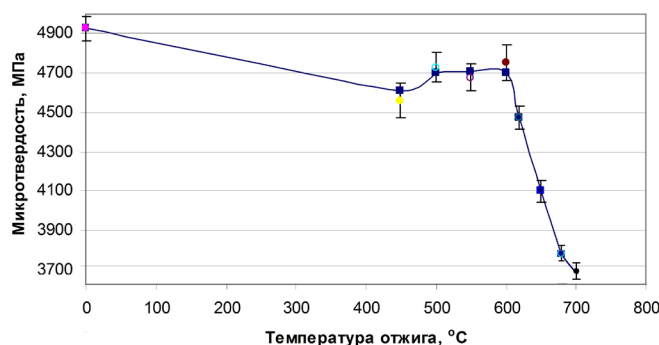


Рис. 3. Изменение микротвердости полуфабриката лопатки при отжиге.

Таблица 1.

Механические свойства сплава ВТ6 в различных состояниях

Состояние		Микротвер- дость, МПа	Прочность σ_b , МПа	Пластичность δ , %
1	Исходный пруток	4868	1180	10
2	Полуфабрикат лопатки, полученной ИЗШ при 650oC	4927	1226	15
3	Полуфабрикат лопатки + отжиг при T=620oC	4471	1150	22
4	Лопатка, выпускаемая по серийной технологии	3257	980	10
5	Серийная лопатка + ТО	3180	965	15
Стандарт по 104.03ТУ42		-	950-1200	≥ 10

но исходя из данных изменения микротвердости и микроструктуры. На рис.3 приведена зависимость микротвердости лопатки от температуры отжига. В состоянии после штамповки микротвердость равна 4868 МПа, при отжиге $T = 450^\circ\text{C}$ происходит падение микротвердости до 4560 МПа, увеличение температуры отжига до 600°C не приводит к значительным изменениям микротвердости образцов. Дальнейшее увеличение температуры отжига приводит к снижению микротвердости. Так после отжига при 620°C микротвердость снижается на 200 МПа, а после отжига при температуре 650°C микротвердость снижается значительно до 4100 МПа. Проведенный анализ микроструктуры термообработанных образцов выявил рост размера зерен, начиная с температуры отжига 620°C .

Таким образом, для отжига лопаток выбрана температура 620°C . На рис.2в представлена микроструктура лопатки после отжига при 620°C . Внутренние напряжения в материале существенно уменьшились, выявляются четкие границы зерен. Средний размер зерен незначительно увеличился до 0,6 мкм.

Результаты сравнительных механических испытаний лопаток из сплава ВТ6, полученных по предлагаемой и серийной технологиям, представлены в таблице 1. В таблице также приведены механические свойства исходных прутков и рекомендованные данные согласно стандарта механических свойств для компрессорных лопаток авиационного двигателя по 104.03ТУ42.

Из таблицы 1 видно, что прочностные свойства (прочность и микротвердость) исследуемых образцов с СМК структурой (состояния 1,2,3) находятся примерно на одинаковом уровне, хотя отжиг приводит к небольшому снижению прочности (состояние 3). В то же время прочность лопатки, выпускаемой по серийной технологии (состояние 4), на 20% ниже прочности СМК лопатки. Пластичность (δ) лопатки с СМК структурой выше δ серийной лопатки. Реко-

мендованный отжиг приводит к повышению пластичности (в 1,5 раза). Свойства всех исследуемых образцов удовлетворяют требованиям технических условий на механические свойства лопаток из титанового сплава ВТ6.

Таким образом, из титанового сплава ВТ6 с СМК структурой можно получать лопатки при пониженных температурах. Лопатки из сплава ВТ6 с СМК структурой обладают повышенными прочностными и пластическими свойствами. При этом температура изготовления лопаток на 260°C ниже обычно применяемой при производстве деталей из этого сплава, что дает значительную экономию электроэнергии, повышает коэффициент использования материала и позволяет перейти от дорогостоящей жаропрочной оснастки к обычным штамповым материалам. Полученные результаты свидетельствуют о перспективах практического применения титанового сплава ВТ6 с СМК структурой.

Литература

1. R.R. Mulyukov, R.M. Imayev, A.A. Nazarov. J. Mater. Sci. **43**, 7257 (2008).
2. R.Z. Valiev, I.V. Alexandrov. Nanostructurnie materialy, poluchennye intensivnoi plasticheskoi deformaziei. Logoz (2000) 271 p. (in Russian) [P.З. Валиев, И.В. Александров Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.:Логос. 2000. 271 с.]
3. M.I. Nagimov, A.A. Nazarov, O. Sarai, G. Purchek, O.R. Valiachmetov, I.M. Safarov, R.R. Mulyukov. Pisma o materialah, **1**(3), 151 (2011). (in Russian) [М.И. Нагимов, А.А. Назаров, О. Сарай, Г. Пюрчек, О.Р. Валиахметов, И.М. Сафаров, Р.Р. Мулюков. Письма о материалах. **1**(3), 151 (2011).]
4. R.R. Mulyukov. Rossiiskie nanotehnologii. **2**(7-8), 38 (2007). (in Russian) [P.P. Мулюков. Российские нанотехнологии. **2**(7-8), 38 (2007).]