

Механические свойства субмикроструктурированного титанового сплава ВТ6, полученного всесторонней изотермической деформацией, перспективы его использования

Мальшева С.П.

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа

Двухфазный титановый сплав ВТ6 широко используется в авиастроении из-за хорошего сочетания механических и технологических свойств. Снижение веса и габаритов изделий может быть достигнуто измельчением его микроструктуры до субмикроструктурированного состояния (СМК) с размером зерен менее 1 мкм. Объемные заготовки с СМК структурой могут быть получены методами интенсивной пластической деформации [1].

Имеется множество работ по исследованию механических свойств титанового сплава ВТ6 с различным размером зерен. Известно, что прочность, твердость, сверхпластические свойства улучшаются с уменьшением размера зерна [1-3]. В то же время измельчение микроструктуры приводит к снижению пластичности, ударной вязкости и сопротивления распространения трещины из-за низкой способности таких материалов к деформационному упрочнению [3]. В настоящей работе рассмотрена микроструктура и механические характеристики в комплексе и установлены границы применимости титанового сплава ВТ6 в СМК состоянии. Этот вопрос интересен и актуален, поскольку титановый сплав ВТ6 с СМК структурой можно использовать в авиастроении для изготовления высокопрочных, облегченных узлов и конструкций, например, компрессорных лопаток авиационного двигателя, которые должны иметь улучшенные свойства. Кроме того, листы с СМК структурой возможно применять в качестве листов-наполнителей для полых лопатки газотурбинного двигателя в авиации [4]. Поэтому целью данной работы было изучить механические свойства сплава ВТ6 с субмикроструктурированной структурой и сравнить их со свойствами этого материала в обычном состоянии.

В работе исследовали титановый сплав ВТ6 (6,5%Al; 5,1%V; 0,1%Fe; 0,03%Si; 0,02%C; 0,01%N) с температурой полиморфного превращения $\alpha \rightarrow \beta$ $T_{\text{пл}}=980^\circ\text{C}$. Субмикроструктурированную микроструктуру в образцах сплава ВТ6 получали методом всестороннейковки с понижением температуры [1]. Температура последнего этапа деформации была 630°C , скорость деформации – около 10^{-3} с^{-1} . В результате были получены объемные образцы со средним размером зерен (фрагментов) 0,5 мкм. В образцах имеются значительные внутренние напряжения. Были исследованы механические свойства образцов из ВТ6 с СМК микроструктурой. Для сравнения механических характеристик сплава ВТ6 были взяты два типа микроструктур: упрочненная по стандартной технологии микроструктурированная МК (с размером частиц α -фазы 5 мкм) и субмикроструктурированная (размер зерен α -фазы 0,5 μm). Образцы обычного термически упрочненного микроструктурированного титанового сплава ВТ6 были получены горячей прокаткой при температуре 880°C с последующим рекристаллизационным отжигом при температуре 840°C в течение 2 ч.

В работе исследовали микротвердость поверхности образцов по Виккерсу, механические характеристики на растяжение при комнатной температуре, предел выносливости, испытания на ударную вязкость на образцах с U-образным концентратором (КСУ) и с наведенной усталостной трещиной (КСТ). Полученные значения механических свойств приведены в таблице 1.

Таблица 1. Механические свойства титанового сплава ВТ6 в различных состояниях.

Состояние	Микротвердость, МПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	Ударная вязкость, МДж/м ²			$\sigma_{0,1}(300)$ МПа	σ_{-1} , МПа
						КСУ	КСВ	КСТ деформированный/отожженный		
МК (5 мкм)	3453	1050	960	18	42	0,45	0,41	0,24	700	580
СМК (0,6 мкм)	3779	1280	1171	10	60	0,37	0,18	0,08/0,15	850	693
СМК (0,15 мкм)	4050	1400	1280	7	56	-	-	-	-	-
МК+ИИ	4539	1139	971	8	31	-	-	-	-	640
СМК+ИИ	4875	1207	1154	7	50	-	-	-	-	720

Установлено, что при комнатной температуре сплав с СМК структурой демонстрирует значения прочности на 250 МПа выше по сравнению с МК состоянием (Табл. 1). Относительное удлинение в СМК

состоянии несколько ниже, чем в МК, но, с другой стороны относительное сужение СМК материала почти в 2 раза больше, чем МК сплава. Также сплав с СМК структурой показывает по сравнению с МК состоянием меньшую равномерную деформацию (δ_p), что свидетельствует о большей склонности к локализации деформации. Предел прочности и предел усталости СМК материала на 20-33% выше, чем у термоупрочненного сплава ВТ6. Микротвердость СМК сплава более чем на 300 МПа выше микротвердости МК состояния. Однако относительное удлинение при растяжении, ударная вязкость и характеристики трещиностойкости заметно снижаются с уменьшением размера зерен.

Сопротивление усталостному разрушению также повышается при измельчении микроструктуры. Значение предела выносливости σ_0 на базе $N=2 \times 10^7$ циклов составило $\sigma_0=683$ МПа для СМК состояния сплава ВТ6 и $\sigma_0=586$ МПа для МК состояния сплава ВТ6.

Результаты ударных испытаний образцов сплава с СМК и МК микроструктурой также приведены в Таблице 1. Ударная вязкость (KCU , KCV , KCT) образцов ВТ6 в СМК состоянии снижается, но по параметру KCU она остается в пределах требований технических условий к сплаву ВТ6 (KCU более 0,35). Наибольшее снижение наблюдается при введении в область надреза трещины ($KCT=0,08$). Таким образом, когда трещина в образце уже имеется, и вся энергия затрачивается только на ее распространение, ударная вязкость СМК образца очень сильно уменьшается. Это связано с мелким размером зерен, когда трещине легко распространяться по большому количеству границ зерен. Вязкость разрушения СМК образца составляет $30,5$ МПа $\sqrt{м}$, что несколько ниже, чем известные значения для этого сплава ($33-110$ МПа $\sqrt{м}$). Увеличить область пластической деформации в вершине трещины и тем самым повысить работу, затрачиваемую на распространение трещины, можно путем отжига материала, который снимает внутренние напряжения, но не приводит к росту зерен. Как показал эксперимент, отжиг СМК сплава ВТ6 при температуре $T=650^\circ\text{C}$ в течение 1 часа увеличивает KCT в 2 раза.

Известно, что преимущество СМК состояния титанового сплава ВТ6 в прочности сохраняется примерно до $T=450^\circ\text{C}$ [3], после чего наблюдается интенсивное разупрочнение, что указывает на интенсивное протекание релаксационных процессов, при этом увеличиваются значения относительного удлинения, что свидетельствует о приближении к области температур сверхпластической деформации. Если сопротивление ползучести при $T=250^\circ\text{C}$ в СМК и МК состоянии практически одинаково, то уже при $T=350^\circ\text{C}$ предел ползучести МК состояния сплава ВТ6 в 2,5 раза выше, чем у СМК состояния сплава. Эти данные соответствуют верхней границе эксплуатационных температур, до которой в сплаве ВТ6 реализуется преимущество СМК состояния у сплава ВТ6.

Длительная прочность сплава ВТ6 с СМК структурой при температуре 300°C за время $t=100$ часов выше ($\sigma_{дл}(300) = 850$ МПа), чем у образца с МК структурой ($\sigma_{дл}(300) = 700$ МПа), несмотря на полученные данные о заметном снижении предела ползучести в СМК состоянии при повышении температуры с 250 до 350°C . Относительные удлинения образцов этих двух состояний примерно одинаковы.

Отмеченные повышения прочности, твердости и выносливости свидетельствует о возможности увеличения ресурса высоконагруженных деталей из титановых сплавов, например, лопаток компрессора газотурбинного двигателя (ГТД).

В связи с этим, из титанового сплава ВТ6 с СМК структурой была изготовлена опытная партия лопаток ГТД штамповкой при $T=650^\circ\text{C}$, которая на 250°C ниже температуры штамповки этих лопаток из сплава ВТ6 по серийной технологии, применяемой на производстве [5]. Исследования микроструктуры и свойств полученных лопаток показали, что СМК структура в лопатках сохраняется, а их прочность на 20% выше прочности лопаток, выпускаемых по серийной технологии и имеющих более крупную структуру. Пластичность лопаток с СМК структурой также выше, а отжиг приводит к дополнительному повышению пластичности в 1,5 раза. Свойства лопаток, изготовленных из СМК сплава ВТ6, удовлетворяют требованиям соответствующего отраслевого стандарта, что позволяет рекомендовать данный материал к использованию для производства лопаток ГТД.

Дополнительное повышение характеристик прочности, износостойкости поверхности и увеличение срока службы изделия возможно достичь путем использования ионной имплантации (ИИ) поверхности изделия (Таблица 1). Поверхностную обработку лопаток проводили облучением ионами азота и аргона. Показано, что ИИ дополнительно увеличивает микротвердость сплава ВТ6 в СМК и МК состояниях. Микротвердость поверхности увеличилась более чем на 1000 МПа [6]. Прочность в МК состоянии с ИИ поверхностью увеличивается на 130 МПа, в СМК состоянии - уменьшилась 100 МПа, при снижении пластичности в обоих состояниях. Снижение характеристик прочности СМК сплава можно объяснить разупрочнением материала при его нагреве в процессе ионной обработки. Предел выносливости сплава ВТ6 в СМК состоянии составляет 600 МПа, а в СМК образцах после ИИ он снижается до 420 МПа, предел выносливости сплава ВТ6 в обычном состоянии составляет 430 МПа. Таким образом, ИИ может оказывать благоприятное воздействие на соотношение прочностных и пластических свойств СМК сплава, приводя к увеличению прочности и сохранению на высоком уровне пластичности по сравнению с МК состоянием, расширяя при этом интервал эксплуатационных температур.

Сочетание отмеченных выше механических характеристик в сплаве ВТ6 с СМК микроструктурой делает перспективным получение из них листов с СМК микроструктурой, которые можно использовать в авиастроении для изготовления высокопрочных, облегченных узлов и конструкций с использованием перспективной технологии сверхпластической формовки (СПФ) и диффузионной сварки (ДС). Эти технологии требуют использования высоких температур и использования дорогостоящего штампового инструмента, поэтому

использование титанового сплава с мелким зерном, снижающим температуру сверхпластичности очень перспективно.

Исследования механических свойств листа из сплава ВТ6 с СМК микроструктурой при температурах 650-900°C показали, что в исследованном интервале температур данный сплав обладает хорошими сверхпластическими свойствами, при этом не выявлено существенной анизотропии в механических свойствах листов, т.е. микроструктура листов достаточно благоприятна для сверхпластического формообразования. Вместе с тем, в листах с СМК структурой наблюдается снижение температуры проявления сверхпластической деформации на 200–250°C по сравнению со сплавом ВТ6 в обычном состоянии [3,9]. Показано, что микроструктура листов с СМК размером зерен стабильна для температур менее 750°C, а при нагреве выше 750°C в листе происходит интенсивный рост зерен.

Полученные результаты были успешно использованы для разработки и оптимизации процесса СПФ. В результате исследований установлено, что листы из титанового сплава ВТ6 с СМК микроструктурой в интервале температур 750–800°C проявляют хорошие сверхпластические свойства, что позволило изготовить из них методом СПФ/ДС трехслойные экспериментальные конструкции [8,10].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМСП РАН № 122011900468-4, 122011900474-5 и 124022900008-6. Исследования выполнены на базе Центра коллективного пользования ИПСМ РАН.

Список литературы

- [1] Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: Эксперимент, теория, технологии. М.: Наука, 2014. 284 с.
- [2] Mulyukov R.R., Imayev R.M., Nazarov. J. Mater. Sci. 43, 7257 (2008)
- [3] Zharebtsov S., Kudryavtsev E., Kostjuchenko S., Malysheva S., Salishchev G. Strength and ductility-related properties of ultrafine grained two-phase titanium alloy produced by warm multiaxial forging. Materials Science and Engineering A 536, 2012. P. 190-196.
- [4] Сафиуллин Р.В., Сафиуллин А.Р., Малышева С.П., Козлов А.Н., Берестов А.В., Галеев Р.М., Валиахметов О.Р. Исследование технологических свойств титанового сплава Ti-6Al-4V. Часть 1. Микроструктура и механические свойства. Письма о материалах, 2016. Т. 6 (4). С. 281-285.
- [5] Малышева С.П. Исследование микроструктуры и механических свойств компрессорных лопаток авиационного двигателя, изготовленных из титанового сплава с субмикроструктурной структурой. Письма о материалах, 2014. Т. 4. В.1. С. 49-51.
- [6] Сафин Э.В., Малышева С.П., Галеев Р.М., Беляева Д.В. Сравнительный анализ структурных состояний и повышенных механических свойств титанового сплава ВТ6. MATERIALS. TECHNOLOGIES. DESIGN, 2020. Т.2. №1(2). с.45-50.
- [7] Сафиуллин Р.В., Малышева С.П., Закирова А.А., Хазгалиев Р.Г., Алетдинов А. Микроструктура и механические свойства плоских образцов из титанового сплава ВТ6. Труды 63-й Международную конференцию "Актуальные проблемы прочности», Тольятти: Издательство ТГУ, 2021. с.281-282.
- [8] R.V. Safiullin, S.P. Malysheva, R.G. Khazhaliev, A.R. Safiullin, A.V. Berestov, E.A. Plaksina. Technological properties of sheet titanium alloys VT6. Письма о материалах. 2023. Т.13. №2. С.98-103
- [9] Жеребцов С.В., Галеев Р.М., Валиахметов О.Р., Малышева С.П., Салищев Г.А., Мышляев М.М.. Формирование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах интенсивной пластической деформацией и их механические свойства. КШП, 1999. № 7. с. 17-22.
- [10] Сафиуллин Р.В., Галеев Р.М., Малышева С.П. «Влияние отжига на микроструктуру и сверхпластические характеристики листов из титанового сплава ВТ6» - В книге: XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. сборник тезисов докладов : в 4 т. Министерство науки и высшего образования РФ; Российская академия наук; Российский национальный комитет по теоретической и прикладной механике; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Санкт-Петербург, 2023. С. 1171-1173.