

Э. В. Сафин, А. М. Смыслов, А. Х. Ильясова, А. М. Щипачев

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 В СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ

Проведено сравнительное исследование влияния различных режимов ионной модификации поверхности азотом на механические свойства и микротвердость титанового сплава ВТ6 с субмикроструктурной (СМК) и микрокристаллической (МК) структурами. Показано, что более интенсивный режим ионной модификации обеспечивает большее упрочнение поверхности образцов в исследуемых состояниях, но в то же время приводит к снижению характеристик прочности образцов в СМК состоянии, что связано, вероятно, с их разупрочнением вследствие нагрева при ионной обработке. *Титановый сплав; субмикроструктурная структура; микрокристаллическая структура; ионное модифицирование; азот; механические свойства*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большое внимание уделяется изучению возможности применения в авиационной промышленности в качестве конструкционных материалов титановых сплавов с измельченной микроструктурой. Повышенное внимание к этим материалам обусловлено тем, что их механические свойства существенно отличаются от крупнозернистых аналогов [1]. В ряде исследований было показано, что двухфазные титановые сплавы с нанокристаллической (НК) и субмикроструктурной (СМК) структурами обладают повышенными характеристиками прочности, сопротивления усталости, износостойкости, а также низкотемпературной сверхпластичностью (очень привлекательным свойством с точки зрения разработки новых ресурсосберегающих технологий) [2, 3].

С другой стороны, материалы с НК и СМК структурами обладают рядом недостатков, сдерживающих использование этих материалов на практике: пониженной термостабильностью [4], ударной вязкостью [5], циклической трещиностойкостью [1], повышенной чувствительностью к концентраторам напряжений, а также интенсивным порообразованием при циклических нагрузках в зоне наибольших напряжений (приповерхностной зоне) [5].

Кроме того, большинство известных методов формирования НК и СМК структуры в достаточно массивных заготовках (кручение под высоким давлением, равноканальное угловое прессование и прессование с многократной сменой оси деформирования) приводят к значительному увеличению стоимости обрабатывае-

мого материала вследствие их низкой производительности.

Другая проблема заключается в сложности выбора эффективных методов и режимов упрочняющей поверхностной обработки СМК и НК титановых сплавов. В этих изначально объемно упроченных материалах с высокой плотностью дислокаций и большой протяженностью границ зерен затруднительно реализовать механизм дополнительного дислокационного упрочнения поверхности, то есть использование таких технологических методов, как обкатка шариком, алмазное выглаживание или дробеструйная обработка практически не даст положительного результата, связанного с существенным повышением микротвердости поверхности и формированием в приповерхностном слое сжимающих остаточных напряжений. Для НК и СМК материалов эти методы полезны лишь с точки зрения улучшения параметров шероховатости поверхности и формирования регулярного микрорельефа. Поэтому, так или иначе, все методы упрочнения поверхности СМК и НК титановых сплавов должны быть связаны с изменением химического состава поверхности, то есть с реализацией механизмов твердорастворного и дисперсионного упрочнения. При этом в процессе поверхностной обработки следует избегать существенного нагрева материалов для недопущения их объемного разупрочнения. В этой связи, по мнению авторов, для модификации поверхностного слоя СМК и НК двухфазных титановых сплавов практический интерес представляет метод ионной имплантации, а для защиты поверхности – методы нанесения различных покрытий при температурах до 200–400 °С, причем чем меньше средний размер зерна сплава, тем ниже должна быть температура поверхностной обработки.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На сегодняшний день в литературе приведены отдельные сведения, касающиеся успешного применения технологии поверхностного упрочнения титанового сплава ВТ6 с СМК структурой, например, ионами азота с низкими энергиями [1, 5], однако повышение характеристик прочности и сопротивления усталости при этом не является слишком существенным.

В этой связи, целью данной работы явилось изучение влияния более интенсивного режима обработки низкоэнергетическими ионами азота на микротвердость поверхности и механические свойства образцов из титанового сплава ВТ6.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнялось на примере широко применяемого в авиационной промышленности двухфазного титанового сплава ВТ6 (6,5%Al; 5,1%V; 0,1%Fe; 0,03%Si; 0,02%C; 0,01%N). В работе использовались два типа микроструктур: упрочненная по стандартной технологии МК (бимодальная с размером частиц α -фазы 5 мкм) и СМК (размер зерен α -фазы 0,5 мкм). Образцы с СМК структурой были подготовлены методом многократной всестороннейковки [1]. МК структура была получена всесторонней ковкой с последующей упрочняющей термообработкой: закалкой и старением [3]. Для исследования влияния упрочняющей обработки поверхности низкоэнергетическими ионными пучками азота на комплекс механических свойств титанового сплава ВТ6 в СМК состоянии и термоупрочненном МК состоянии половина исследуемых образцов была подвергнута ионной модификации азотом (ИМ) на бессепарационном ионно-плазменном ускорителе модели ВИТА. При этом для одной части образцов использовался режим с энергией ионов $E = 250\text{--}300$ эВ, $I = 5$ мА/см² и $D = 2 \times 10^{19}$ ион/см² (режим 1) [6], а для второй – режим ИМ с повышенной плотностью ионного тока и дозой облучения: $E = 250\text{--}300$ эВ, $I = 15$ мА/см², $D = 5 \times 10^{19}$ ион/см² (режим 2).

Микротвердость поверхности образцов по Виккерсу определяли на микротвердомере «Viehler» модели Micromet 5101. Исследования выполняли на микрошлифах с размерами 15×15×2 мм.

Испытания механических свойств при растяжении сплава ВТ6 в различных состояниях проводили на динамометре «Instron». Для определения механических свойств были изготовлены плоские образцы с габаритными размерами

22×11×1,5 мм. Механические характеристики определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование шлифов показало (рис. 1), что высокая доза облучения при ИМ по режиму 2 вызвала распыление (ионное травление) поверхности.

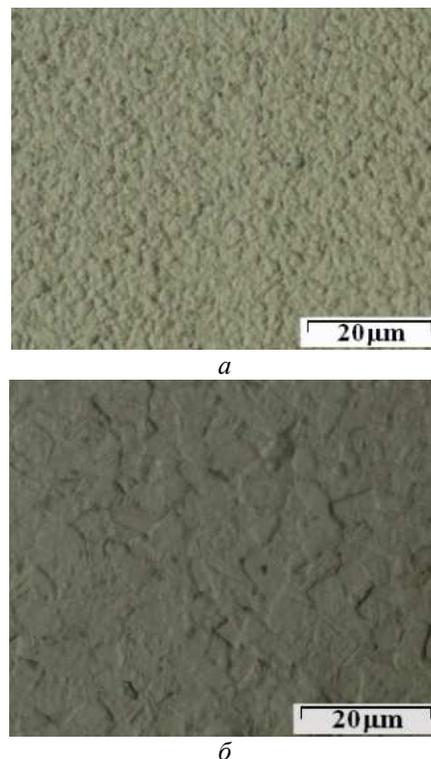


Рис. 1. Поверхности микрошлифов сплава ВТ6 после ионной модификации: а – СМК состояние; б – МК состояние

На рис. 2 представлен график зависимости микротвердости поверхности сплава ВТ6 при различных нагрузках на индентор. Из графика видно, что в исходных СМК и МК образцах величина нагрузки на индентор не влияет на значения микротвердости. В образцах после ИМ с увеличением нагрузки на индентор микротвердость уменьшается, что говорит о повышенных значениях микротвердости именно на поверхности образцов.

Отметим, что ИМ значительно увеличивает микротвердость поверхности образцов как в СМК, так и в МК состоянии: в СМК состоянии микротвердость поверхности увеличилась на 1100 МПа, а в МК состоянии – на 900 МПа. Это можно объяснить тем, что при азотировании титанового сплава ВТ6 вначале происходит образование твердого раствора внедрения азота в α - и β -фазах титана, затем протекает иници-

рованное азотом $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение с образованием на поверхности фаз нитридов титана состава от Ti_2N до TiN . В СМК сплаве после ИМ поверхности наблюдается большее увеличение микротвердости по сравнению с МК состоянием, вероятно, из-за более глубокого проникновения ионов азота в поверхностные слои.

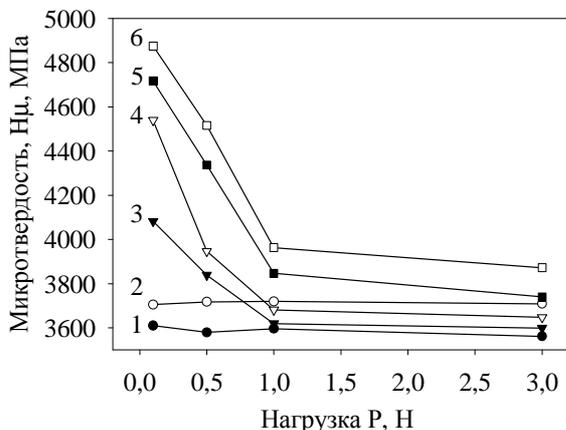


Рис. 2. Микротвердость поверхности сплава ВТ6 при различных нагрузках на индентор: 1 – МК; 2 – СМК; 3 – МК + 1 режим ИМ; 4 – МК + 2 режим ИМ; 5 – СМК + 1 режим ИМ; 6 – СМК + 2 режим ИМ

Данные по механическим свойствам сплава ВТ6 в различных состояниях представлены в таблице.

Сплав с СМК структурой демонстрирует значения прочности на 200 МПа выше по сравнению с МК состоянием. Относительное удлинение в СМК состоянии находится на уровне удлинения МК образцов, но, с другой стороны, относительное сужение СМК материала несколько ниже, чем у МК сплава.

Ионное модифицирование приводит к некоторому (на 25 МПа) повышению прочности сплава в МК состоянии, что обусловлено действием дисперсионного, твердо-растворного механизмов упрочнения [1, 5]. Однако в СМК состоянии после ионной модификации по примененному режиму наблюдалось существенное (порядка на 150 МПа) снижение характеристик прочности, что можно объяснить разупрочнением материала при его нагреве в процессе ионной обработки.

ВЫВОДЫ

1. Ионная модификация азотом позволяет повысить микротвердость поверхности сплава ВТ6 в микрокристаллическом термоупрочненном и субмикрокристаллическом состояниях вследствие действия механизмов дисперсионного, твердо-растворного и дислокационного упрочнения поверхности.

2. Применение выбранного интенсивного режима ионной модификации азотом с повышенной плотностью ионного тока и дозой облучения не является эффективным для сплава ВТ6 с СМК структурой вследствие разупрочнения данного материала при нагреве в процессе ионной обработки.

3. Актуальной является задача поиска и определения оптимального сочетания объемного (при измельчении зерна) и поверхностного (при реализации твердо-растворного, дисперсионного и дислокационного механизмов) упрочнения промышленных двухфазных титановых сплавов с целью получения комплекса повышенных эксплуатационных характеристик изготавливаемых из них деталей.

Механические свойства и микротвердость поверхности титанового сплава ВТ6 в различных состояниях

Состояние сплава	σ_B , МПа		$\sigma_{0,2}$, МПа		ψ , %		δ , %		Hц, МПа (P = 0,1Н)	
	Режим 1	Режим 2	Режим 1	Режим 2	Режим 1	Режим 2	Режим 1	Режим 2	Режим 1	Режим 2
МК	1257	1163	1135	1036	41,4	47,7	7,6	14,9	3548	3660
МК+ИМ	1267	1189	1159	1104	39,0	45,4	7,6	14,7	4082	4539
СМК	1302	1329	1178	1166	60,1	41,5	7,4	14,8	3705	3786
СМК+ИМ	1478	1177	1243	1128	50,1	45,1	7,2	14,2	4717	4875

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние субмикро-кристаллической структуры на усталостную прочность титанового сплава ВТ6 / С. В. Жеребцов [и др.] // Перспективные материалы. 1999. № 6. С. 16–23.
2. **Валиев Р. З., Александров И. В.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 271 с.
3. Полуфабрикаты из титановых сплавов / В. К. Александров [и др.]. М.: Металлургия, 1979. 512 с.
4. **Лутфуллин Р. Я., Мухаметрахимов М. Х.** Влияние исходной структуры на механические свойства соединенных в сверхпластическом состоянии образцов титанового сплава ВТ6 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2006. № 2. С. 11–13.
5. Перспективы промышленного применения титановых сплавов с нано-кристаллической структурой в авиационной промышленности / Э. В. Сафин [и др.] // Физикохимия ультрадисперсных систем: Сб. тр. VIII Всероссийск. конф. М.: МИФИ, 2009. С. 268–272.
6. Патент РФ № 2117073 МКИ6 С23С 14/48. М. И. Гусева [и др.]. Способ модификации поверхности титановых сплавов. Опубликовано 10. 08. 98.

ОБ АВТОРАХ

Сафин Эдуард Вилардович, доц. каф. стандартизации и сертификации. Дипл. инженер по технологии машиностроения, металлорежущим станкам и инструментам (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук по технологии машиностроения и материаловедению (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. технологическ. методов упрочнения поверхности титановых сплавов.

Смыслов Анатолий Михайлович, зав. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по производству двигателей летательн. аппаратов (УГАТУ, 1994). Иссл. в обл. формирования свойств поверхности с использованием ионных, плазменных и электронных пучков в соответствии с условиями эксплуатации деталей.

Ильсова Альбина Халиловна, асп. той же каф. Дипл. инженер по стандартизации и сертификации (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. технологическ. методов упрочнения поверхности титановых сплавов.

Щипачев Андрей Михайлович, проф. той же каф. Дипл. инженер по технологии машиностроения, металлорежущим станкам и инструментам (УАИ, 1981). Д-р техн. наук по материаловедению в машиностроении (ИПСМ РАН, 2000). Иссл. в обл. прогнозирования характеристик усталостной прочности с учетом технологии обработки.