

УДК 669.295

**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
($\alpha+\beta$)-ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

**В. Г. Шевченко, к. т. н., доц., Т. А. Глотка, асп., Т. А. Коваленко, асп.,
М. Н. Перепелкина, асп.**

Запорожский национальный технический университет

1. Введение и цель работы

Анализ публикаций последних лет [1] позволил сделать вывод, что для повышения механических свойств конструкционных металлов без дополнительного легирования эффективным методом является формирование нано- и субмикроструктурной (СМК) структуры. Из существующих технологий наноструктурирования наиболее эффективной, позволяющей получать объемные заготовки для изготовления среднегабаритных деталей, является технология интенсивной пластической деформации (ИПД) методом винтовой экструзии ВЭ [2].

Однако нестабильное состояние субмикроструктурной структуры после ИПД и снижение значений относительного удлинения, ударной вязкости и характеристик жаропрочности [3] обуславливают необходимость термической стабилизации СМК-структуры и повышения механических свойств СМК-титановых сплавов после ИПД. Известно, что варьирование температурными режимами термической обработки является одним из наиболее эффективных методов воздействия на размер, морфологию и термодинамическое состояние конструкционных металлических материалов.

Таким образом, целью настоящей работы являлось определение влияния температур отжига на структуру и механические свойства СМК-сплава ВТ8М-1 и установление оптимальных режимов, позволяющих обеспечить сочетание высокой прочности и регламентированных стандартом [4] характеристик пластичности и типа микроструктуры.

2. Материалы, оборудование, методика проведения исследований

Заготовки для ИПД выплавлены из ($\alpha+\beta$)-сплава ВТ8М-1 методом вакуумно-дугового переплава (ВДП). Масса слитка составила 1,5 кг. С целью равномерного распределения легирующих элементов в слитке осуществляли двойной переплав по технологии, применяемой на ГП «ЗТМК» [5]. Химический состав слитка определяли спектральным анализом по ГОСТ 1 9863.1-19863.13.

Интенсивная пластическая деформация реализована методом винтовой экструзии в ДонФТИ им. А.А. Галкина [6]. Структурный анализ проводили с использованием растрового электронного микроскопа JSM – T300 фирмы JEOL при ускоряющем напряжении 20...30 кВ во вторичных электронах. Количественную оценку структурных составляющих сплавов осуществляли по изображениям микроструктуры с расширением файла *.bmp при помощи компьютерной программы, методика которой приведена в публикации [7]. После проведения ИПД методом ВЭ, исследуемые образцы подвергали отжи-

гу в вакуумной лабораторной печи СНВЭ-1.3.1/16 (точность измерения температуры $\pm 5^\circ\text{C}$). Механические характеристики определяли в соответствии с ГОСТ 1497-84.

3. Результаты исследований и их обсуждение

После ИПД механические свойства определяли как при нормальной температуре, так и при повышенной (кратковременную прочность). За температуру испытания выбрана максимальная температура эксплуатации целого ряда титановых деталей ГТД (болты, рычаги, гайки, кронштейны), составляющая 450°C . Результаты механических испытаний представлены в таблице 1.

*Таблица 1
Механические свойства субмикроструктурного сплава ВТ8М-1
после ИПД*

№ слитка	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	σ_B^{450} , МПа
1	1320	6	43	27	600
2	1285	7	39	35	512
3	1330	6	39	30	597
Нормы ОСТ 190006-86	980...1180	≥ 10	≥ 35	≥ 40	≥ 665

Согласно данным таблицы 1 относительное удлинение, ударная вязкость и кратковременная прочность при 450°C в сплаве ВТ8М-1 с субмикроструктурной структурой ниже требуемых стандартом норм, предел прочности в среднем в 1,2 раза превышал нормы стандарта.

Микроструктура слитка сплава ВТ8М-1 характеризовалась крупными (до 100 мкм) β -превращенными зёрнами с пластинчатым внутризёрненным строением (рис. 1 а). После ИПД она представляла собой дисперсную смесь из α - и β -фаз, без четкой границы раздела, размеры которых находились в пределах 0,5...1 мкм (рис 1б). Измельчение микроструктуры в процессе пластической деформации, как известно, повышает работу деформации за счет увеличения протяженности межзёрненных границ и образования полос двойникования, выступающих в роли регулярных барьеров на пути развития трещины.

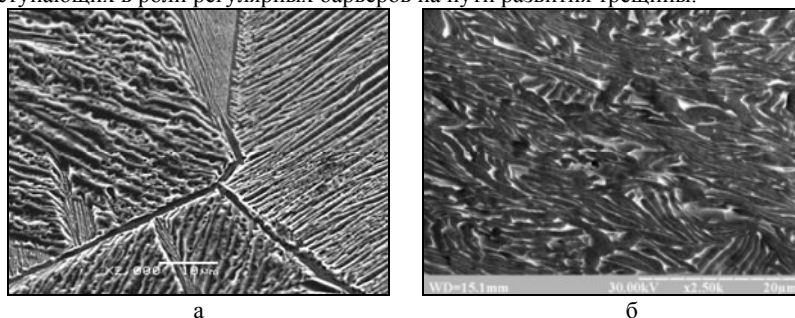


Рис. 1. Микроструктура сплава ВТ8М-1 (x2000): а – исходная литая заготовка; б – после ИПД

После отжига при различных температурах изменялась структура СМК-сплава ВТ8М-1. До температуры 550°C размеры фазовых составляющих сплава находились на уровне 1...2 мкм, (рис. 2 а).

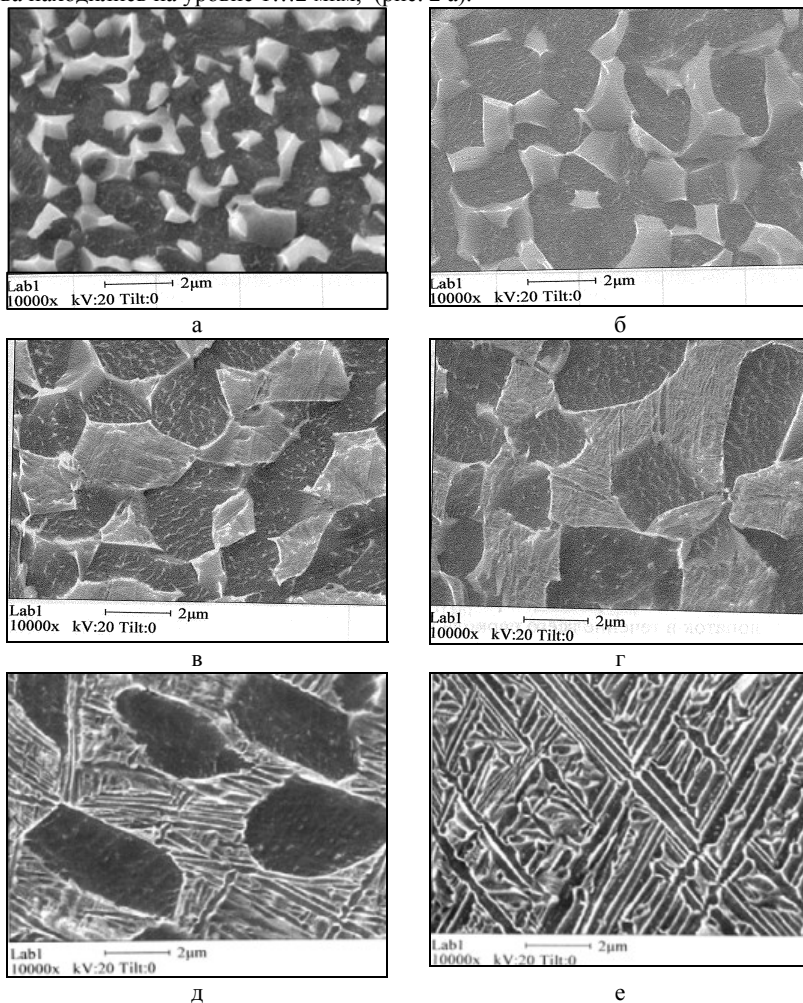


Рис. 2. Микроструктура образцов из сплава ВТ8М-1, подвергнутого ИПД и отжигу при температурах: а - 550°C; б - 650°C; в - 750°C; г - 850°C; д - 950°C; е - 1050°C

После отжига 650°C укрупнились частицы α - и β -фаз, отдельные из них увеличивались за счет слияния с более мелкими, частицы фаз приобрели фор-

му, близкую к равноосной (рис. 2 б), а с температуры 750°C количество α -фазы уменьшалось, а соответственно β -фазы – увеличивалось от ~50% (рис. 2 в) до ~70% - после отжига при 850°C (рис. 2 г) и 100% - при температурах выше 950°C (рис. 2 д). Нагрев при 950°C обусловил формирование после охлаждения тонкопластинчатой структуры внутри β -превращенных зерен, что свидетельствовало о нагреве выше температуры полиморфного ($\alpha \leftrightarrow \beta$)-превращения.

Из полученного набора микроструктур видно, что уже при 550...600°C из СМК-структуры в сплаве ВТ8М-1 формируется стандартная микроструктура равноосного типа, при 650...750°C – бимодального типа. В то время как для ее получения по стандартной технологии требуется высокотемпературный нагрев вблизи β -области ($T_{пп}$ -30°C) с последующим отжигом при 550°C. Снижение температур отжига для ($\alpha + \beta$)-сплава, размер зерен в котором не превышает 1 мкм, можно объяснить снижением энергии активации, необходимой для роста зерен ввиду термодинамически нестабильного состояния после ИПД и увеличением скорости диффузионных процессов, имеющих место при нагревании сплава.

Микроструктурные преобразования обусловили изменение механических свойств СМК-сплава ВТ8М-1, результаты испытаний которых приведены в таблице 2.

Таблица 2

Влияние температуры отжига на механические свойства субмикроструктурного сплава ВТ8М-1

$T_{отжига}^*, ^\circ C$	$\sigma_B, МПа$	$\delta, \%$	$\psi\%$	КСУ, Дж/см ²	$\sigma_B^{450}, МПа$
550	1210	10	35	40	665
650	1206	12	47	43	670
750	1153	18	50	52	677
850	980	23	51	52	675
950	809	11	34	55	600

Примечание.* Время выдержки при температуре отжига для каждого образца составило 40 мин., охлаждение- на воздухе.

Из результатов механических испытаний и микроструктурных исследований можно сделать вывод о том, что отжиг СМК-сплава ВТ8М-1 при температурах 550...750°C позволяет получить в сплаве микроструктуру стандартного типа. При этом предел прочности и относительное сужение сплава выше стандартных норм, а относительное удлинение, ударная вязкость и кратковременная прочность при 450°C соответствует требованиям для сплава ВТ8М-1 .

Таким образом, отжиг по оптимальному режиму обеспечивает комплекс механических свойств ($\alpha + \beta$)-титановых сплавов, для деталей, эксплуатирующихся как при нормальной (20°C), так и кратковременно работающих при

температурах до 450°C. Для длительной эксплуатации деталей из СМК-титановых сплавов ВТ8, ВТ8М-1, ВТ25У в условиях повышенных температур необходимо проведение дополнительных исследований по обеспечению характеристик жаропрочности (предела длительной прочности и ползучести).

4. Выводы

Отжиг субмикроструктурного (СМК) сплава ВТ8М-1 при 550°C обеспечил формирование микроструктуры равноосного типа, при температуре 750°C – бимодального типа. При этом в сплаве с исходной СМК-структурой повышены относительное удлинение, ударная вязкость и кратковременная прочность при 450°C до уровня стандартных требований для сплава ВТ8М-1, при сохранении повышенной в результате ИПД прочности.

Использованная литература

1. Применение винтовой экструзии для получения субмикроструктурной структуры и гомогенизации титанового сплава ВТ3-1 / Д.В. Павленко, А.В. Овчинников, А.Я. Качан [и др.] // Вестник двигателестроения. – 2007. - № 2. – С.185-188.
2. Получение заготовок субмикроструктурных ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов из слитков / А.В. Овчинников, Т.А. Коваленко // Теория и практика металлургии. – 2010. – № 5-6.- С.11-15.
3. Формирование субмикроструктурной структуры в титане и титановых сплавах и их механические свойства / Г.А. Салищев, Р.М. Галеев, С.П. Малышева [и др.] // МиТОМ. – 2006. - № 2. – С. 19-26.
4. Заготовки из титановых сплавов для изготовления лопаток. Технические условия : ОСТ 1 90006:1986. – [Срок введения с 1986-10-01]. – М.: ВИАМ 1986. – 20с. – (Отраслевой стандарт).
5. Давидов С.І. Удосконалення технології одержання титану із заданим вмістом кисню : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів і спеціальних сплавів» / С.І. Давидов. – Запоріжжя, 2010. – 20, [1] с.
6. Новые схемы накопления больших пластических деформаций с использованием гидроэкструзии / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, С.Г. Сынков [и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 1999. - №3 (т. 9). – С.109-111.
7. Комплексный анализ металлографических структур : сб. научных трудов, 21-22 апреля 2009 г., Днепропетровск. Вып. 48, ч. 3 / под общ. ред. Большакова В.И.: Днепропетровск : ПГАСА, 2009. – С. 64-65, - (Стародубовские чтения: строительство, материаловедение, машиностроение).