



ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ОПЫТНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА Т-110

**С. Л. Антонюк, В. Н. Король, А. Г. Моляр,
И. М. Ромашко В. Н. Замков, В. Ф. Топольский**

Определены прочностные характеристики кованых полуфабрикатов опытного высокопрочного ($\alpha+\beta$)-титанового сплава системы Ti-Al-Mo-V-Nb-Fe-Zr (Т-110) после различных режимов ковки и термической обработки. Разработаны технологические параметры ковки и термической обработки, обеспечивающие необходимый уровень механических свойств. Показано, что кованый сплав Т-110 по уровню прочности не уступает поковкам промышленного сплава VT22 в отожжённом состоянии.

Strength characteristics of forged semi-products of experimental high-strength ($\alpha+\beta$)-titanium alloy of Ti-Al-Mo-V-Nb-Fe-Zr (Т-110) system after different conditions of forging and heat treatment are defined. Technological parameters of forging and heat treatment providing the required level of mechanical properties are developed. It is shown that the as-annealed forged alloy Т-110 is inferior by the level of strength to the forgings of industrial alloy VT22.

Ключевые слова: титановые сплавы; термическая обработка; ковка; микроструктура; механические свойства.

Введение

Прогресс авиационной техники сопровождается постоянным повышением требований к качеству и уровню свойств применяемых материалов с целью обеспечения как максимальной эксплуатационной надежности летательных аппаратов, так и их высокой весовой эффективности.

Для уменьшения массы летательных аппаратов в конструкциях их силовых элементов применяют высокопрочные двухфазные ($\alpha+\beta$)-титановые сплавы. Прочность этих сплавов определяется не только степенью легирования, но и параметрами обработки давлением, последующей термической или термо-механической обработки. Однако с повышением прочности сплава, как правило, снижается его пластичность, что является существенным недостатком материала при изготовлении из него конструкций, работающих на вибрацию, повторную статику, изгиб, ударные нагрузки. Поэтому в последнее время все большее внимание уделяется совершенствованию ($\alpha+\beta$)-титановых сплавов, оптимизации параметров деформирования слитков при изготовлении из них полуфабрикатов и режимам упрочняющей термической обработки.

Физико-химические и теплофизические особенности титана и сплавов на его основе требуют тща-

тельного подхода к процессам их деформирования. Это обусловлено следующими факторами. Пониженная теплопроводность титановых сплавов приводит к температурным перепадам по сечению слитков и заготовок при их нагреве, возникновению значительных внутренних напряжений, а в отдельных случаях к образованию трещин. Это обуславливает необходимость ограничения скорости нагрева особенно слитков и заготовок больших размеров. При охлаждении заготовок также могут возникать значительные температурные перепады. Например, быстрое захлаживание острых углов, тонких элементов сечений заготовок чрезвычайно затрудняет обеспечение равномерной деформации, приводит к образованию трещин и ряда других дефектов.

Низкая теплопроводность титана и его сплавов отрицательно влияет непосредственно на процесс горячей деформации. Вследствие теплового эффекта деформации при больших степенях укова наблюдается значительный перегрев металла в зонах интенсивной деформации, ухудшение его структуры и свойств. Особенно это проявляется при неблагоприятных режимах ковки (осадки) заготовок, сортовой прокатки прутков и других деформационных процессов. Предупредить образование таких зон с неблагоприятной структурой возможно только при тщательном выборе схемы, степени, скорости и начальной температуры деформации металла.



Таблица 1. Режимы деформации и нагрева при ковке опытного титанового сплава Т-110

Операция	Слиток		Слиток-сляб		Продолжительность операции, ч
	Схема 1		Схема 2		
	а	б	а	б	
Нагрев	1180 °С	1050 °С	1180 °С	1050 °С	3
Осадка на 1/3 высоты					0,5
Смена оси и протяжка на квадрат					
Смена оси и осадка на 1/3 высоты					0,5
Подогрев заготовки	920 °С	950 °С	920 °С	950 °С	
Протяжка на квадрат 200 мм и рубка на мерные заготовки					0,5
Подогрев заготовок	900 °С	920 °С	900 °С	920 °С	0,5
Протяжка на квадрат 120 мм и рубка на мерные заготовки					0,5
Подогрев заготовок	850 °С	860 °С	850 °С	860 °С	1
Протяжка на квадрат 50 мм и рубка на мерные заготовки					0,5

При температурах нагрева, необходимых для горячей деформации или термической обработки, титановые сплавы активно взаимодействуют с кислородом, азотом, водородом и другими газами атмосферы, происходит их диффузия в глубь металла, образуются поверхностные газонасыщенные слои. Они характеризуются высокой твердостью и низкой пластичностью, способствуют появлению поверхностных надрывов при деформации, ухудшению качества поверхности полуфабрикатов. Эффективный метод предотвращения образования газонасыщенных слоёв — применение защитных покрытий,

предохраняющих металл от поглощения газов не только при нагреве, но и в процессе самой деформации и последующего охлаждения.

Нагрев ($\alpha+\beta$)-сплавов титана до температур, соответствующих однофазной β -области, сопровождается значительным повышением пластичности, особенно при деформировании литого металла, снижением сопротивления деформированию. Однако деформация только в β -области не позволяет получить структуру металла, обеспечивающую его высокие эксплуатационные свойства. Оптимальная структура может быть получена при деформации в ($\alpha+\beta$)-обла-

сти, однако пластичность металла, особенно в литом состоянии, в этом интервале температур значительно ниже, а сопротивление деформированию выше. В практике промышленного производства это противоречие преодолевается при осуществлении деформации в две стадии: деформации слитков в β -области и последующей деформации в $(\alpha+\beta)$ -области. Степень деформации на этих стадиях подбирают, исходя из требуемого общего формоизменения металла при изготовлении полуфабриката. Минимальное значение степени деформации на первой стадии определяется необходимостью получения мелкозернистой макроструктуры, на второй стадии — получением оптимальной микроструктуры. Применительно к различным видам полуфабрикатов этот принцип реализуется в различных вариантах значений степени и температуры деформации [1].

Цель данной работы состояла в том, чтобы установить параметры деформации при ковке и режимы последующей термической обработки, обеспечивающие требуемый уровень механических свойств титанового сплава Т-110.

Методика эксперимента

В качестве исходных литых заготовок сплава Т-110 использовали слитки-слябы размером 400×200×1000 мм, а также круглые слитки диаметром 380 мм и длиной 1000 мм. Слитки выплавляли

Таблица 2. Механические свойства сплава Т-110 послековки

Схемаковки	Вид полуфабриката	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	$KCU_{,2}$ Дж/см ²
1-а	Пруток	1131... 1162	11,6... 16	40,8... 50,4	39... 44
	Поковка	1119... 1153	14... 18	47,3... 53	38... 49
1-б	Поковка	1063... 1083	14... 16	34,4... 47,3	35... 50

(двойной переплав) в электронно-лучевой установке с промежуточной ёмкостью УЭ-121 в НПЦ «Титан» ИЭС им. Е. О. Патона. Для правильного выбора температурных условий деформирования и режимов последующей термической обработки методом закалки определяли температуру полиморфного $\beta \leftrightarrow (\alpha+\beta)$ превращения литого металла. Для

Таблица 3. Механические свойства кованных прутков после термической обработки

Режим термической обработки	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	$KCU_{,2}$ Дж/см ²
1	1100... 1150	9,6... 13,5	34,4... 49,8	40... 44
2	1180... 1240	9,6... 16,9	41,6... 53,7	40... 56
3	1130... 1195	13,1... 20,8	48... 58,2	49... 57

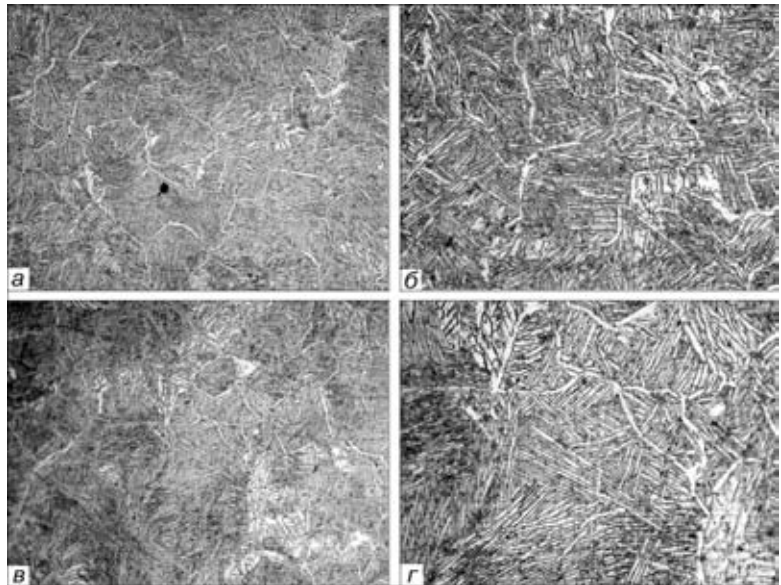


Рис. 1. Микроструктура сплава Т-110 послековки по схемам 1-а (а, б) и 1-б (в, г); а, в — ×200; б, г — ×400

обоих слитков она составила 905 °С. В качестве примера приведем химический состав круглого слитка сплава Т-110, % мас: Ti — основа, Al 5,35, Mo 1,10, V 1,37, Nb 5,04, Fe 1,60, Zr 0,35, O₂ 0,09, N₂ 0,02, H₂ 0,003.

Круглый слиток и слиток-сляб подвергали предварительной ковке на пруток диаметром 120 мм. Далее этот пруток перековывали на квадратный пруток со стороной 50 мм и подвергали термической обработке.

В условиях данной работы требовалось получить следующие механические свойства: $\sigma_b \geq 1100$ МПа, $KCU \geq 40$ Дж/см², т. е. необходимо было обеспечить высокую пластичность при одновременном сохранении высокого уровня прочности. Такие граничные условия являются типичными при выборе материалов для высоконагруженных элементов самолетных конструкций, в частности шасси.

Деформацию ковкой выполняли по двум схемам (табл. 1) соответственно для слитка и сляба. Параметром, который изменяли в процессековки, была температура. При этом обязательным условием было то, чтобы деформация на предпоследний промежуточный и окончательный размеры выполнялась при температуре ниже температуры $\beta \rightarrow (\alpha+\beta)$ превращения не менее чем на 50 °С.

Таблица 4. Механические свойства полуфабрикатов из сплава BT22

Вид полуфабриката	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	$KCU_{,2}$ Дж/см ²
Пруток диаметром 42 мм	1180	16,5... 17,0	56... 58,9	40
Пруток диаметром 70 мм	1196... 1198	12... 16	35,2... 40,9	48... 53
Пруток диаметром 120 мм	1200... 1210	4,6... 5,4	16... 17,1	28... 29
	1240	10... 12	28,6... 32,2	21... 28

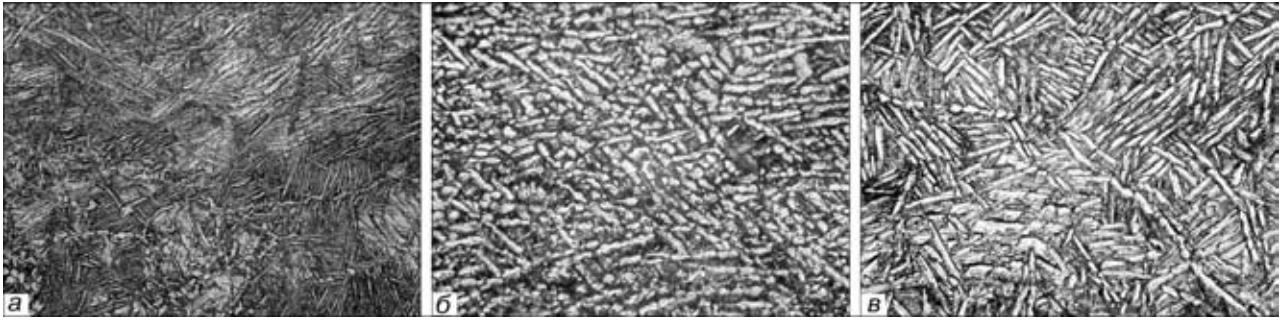


Рис. 2. Микроструктура ($\times 500$) кованых прутков из сплава Т-110 после термической обработки: по режимам: а — 1; б — 2; в — 3

Для определения оптимальных температурных режимов ковки провели предварительную ковку небольших темплетов массой 20 кг с соблюдением всех операций, приведенных в табл. 1. Темплеты были перекованы на пруток и поковки и затем подвергнуты термической обработке по одному общему режиму: отжиг при температуре $780\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе со скоростью $5\text{...}8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Результаты испытаний этих поковок и прутка на статическое растяжение и ударную вязкость приведены в табл. 2.

Из данных таблицы видно, что схема ковки 1-а дает более стабильные результаты и обеспечивает лучшее сочетание механических характеристик, чем ковка по схеме 1-б. Это, по-видимому, обусловлено тем, что в первом случае на первом переходе ковки в процессе деформации при более высокой температуре нагрева имеет место лучшая проработка исходной литой структуры. Анализ микроструктуры кованого металла подтверждает такое предположение (рис. 1). Тип зерна микроструктуры соответствует 4–6 типу по 9-типной шкале ВИАМ. Однако после ковки по схеме 1-б вследствие недостаточной проработки структуры литого металла в процессе деформации в его микроструктуре наблюдается существенная разнорзернистость.

По результатам этих предварительных экспериментов ковку круглого слитка и слитка-сляба выполняли по схеме 1-а. Кованые прутки подвергали термической обработке по следующим режимам: 1. Нагрев до температуры $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе; 2. Нагрев $870\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 0,5 ч, охлаждение с печью до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 0,5 ч, охлаждение с печью до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе; нагрев $380\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 8 ч, охлаждение на воздухе; нагрев $570\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе; 3. Вакуумный отжиг при температуре $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержка 1 ч.

Режимы термической обработки сплава Т-110 были выбраны ранее [2]. Механические свойства кованых прутков после термической обработки представлены в табл. 3. Для сравнения в табл. 4 приведены типичные после термической обработки свойства полуфабрикатов из сплава ВТ22.

Микроструктура металла прутков после термической обработки представлена на рис. 2.

Исследования структуры показали, что макро-структура прутков соответствует 4–5 баллу по 10-балльной шкале макро-структур, а тип зерна микроструктуры соответствует 3–4 типу по 9-типной шкале микроструктур. Микроструктура металла

прутков после термической обработки по режимам 2 и 3 имеет глобулярную морфологию α -выделений внутри зёрен. Причем в процессе ступенчатой обработки глобуляризация выделений α -фазы происходит в более полном объеме. Наряду с глобулярными выделениями в структуре присутствуют и пластинчатые выделения. Такой тип структуры относят к бимодальной. При вакуумной термообработке (режим 3) глобулярных выделений значительно меньше, а пластинчатые выделения формируют структуру в виде корзиночного плетения.

Выводы

1. Выбраны параметры ковки опытного титанового сплава Т-110. Установлено, что для более полной проработки литой структуры в процессе деформирования предварительную ковку в β -области необходимо выполнять при температуре не ниже $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Кованые прутки из сплава Т-110 имеют уровень прочности в отожженном состоянии не менее 1100 МПа, не уступая по этому показателю сплаву ВТ22, а по уровню пластичности и ударной вязкости его превосходят.

3. Вакуумный отжиг (режим 3) позволяет получить наиболее высокую пластичность и ударную вязкость сплава Т-110. Многоступенчатая термическая обработка (режим 2) сплава Т-110 обеспечивает наилучшее сочетание показателей прочности и пластичности. Отжиг при температуре $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ (режим 1) является наиболее простым по исполнению видом термической обработки и также обеспечивает минимально необходимый уровень механических свойств.

4. Макро- и микроструктура полученных кованых прутков соответствует 4–5 баллу 10-балльной шкалы макро-структур и 3–4 типу 9-типной шкалы микроструктур, т. е. соответствует требованиям, предъявляемым к параметрам структуры этого типа полуфабрикатов.

1. *Полуфабрикаты* из титановых сплавов / В. К. Александров, Н. Ф. Аношкин, А. Г. Бочвар и др. — М.: Металлургия, 1979 — 512 с.
2. С. Л. Антоноук, А. Г. Моляр, А. Н. Калинюк, В. Н. Залисов. Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины // Современная электрометаллургия. — 2003. — № 1. — С. 10–14.

АНТК им. О. К. Антонова, Киев

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 07.06.2003