

钛合金的模锻与挤压

〔苏〕Л. А. 尼克里斯基 等著

陈石卿 焦明山 译

国防工业出版社

054571

钛合金的模锻与挤压

〔苏〕Л. А. 尼克里斯基 等著

陈石卿 焦明山 译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书阐述了钛合金毛坯自由锻、热模锻和挤压的基本工艺问题,讨论了模锻的热机械规范、毛坯的结构要素和精度、变形力的确定、设备选择、工步计算、毛坯清理等等。书中也介绍了钛合金 β 锻、高速锻及等温锻等新的压力加工方法。

本书供生产、设计和设计部门的技术人员使用,也可供高等院校金属压力加工专业的师生参考。

ГОРЯЧАЯ ШТАМПОВКА И ПРЕССОВАНИЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Л. А. Никольский, С. З. Фиглин, В. В. Бойцов,
Ю. Г. Калпин, А. В. Бахарев
《Машиностроение》1975 г

钛合金的模锻与挤压

〔苏〕Л. А. 尼克里斯基 等著
陈石卿 焦明山 译

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 9³/₄ 246 千字

1982年2月第一版 1982年2月第一次印刷 印数: 0,001—2,900册

统一书号: 15034·2291 定价: 1.25元

6020126

序 言

01

人们称钛为未来的金属。近年来，还没有一种金属的生产发展如此迅速。

钛的实际应用始于 1948 年，当时第一批工业钛问世，重量只有 2 吨。1953 年，全世界钛的产量已经是 2100 吨，到 1957 年底，达到了 20000 吨。1966 年，钛产量（不包括苏联）为 22000 吨。

苏联于五十年代初期就组织了钛的工业生产，许多学者和工程师如 С. Г. 格拉尊诺夫 (С. Г. Глазунов)、В. А. 立万诺夫 (В. А. Ливанов)、Г. Д. 阿嘎尔科夫 (Г. Д. Агарков) 等人参加了苏联钛工业的组建和发展工作。在短时间内建成了世界上巨大的工业部门之一——有色冶金工业，这个部门获得了不断的高速发展。

在生产发展速度上，钛超过了铝和镁，这是由于钛及钛合金能够更充分地满足一系列现代主要技术部门不断增长的要求。这些部门有航空、导弹制造、舰船制造、化工和食品机械制造、医疗器材等。

钛及钛合金一方面具有许多重要的使用性能，如室温和高温（在 600°C 以下）比强度高，在许多种化学活性介质中具有抗腐蚀能力，同时还能满足主要的工艺性要求。钛及钛合金塑性好，能够满意地进行切削加工，可以很好地进行焊接。除了这些纯自然性质外，正确选择加工参数对钛合金的工艺性有着极大的影响，苏联的钛工业部门和一些发达国家在加工参数的研究方面积累了丰富的经验。这里还必须指出，针对每个具体场合选择最适宜的合金是一个重要因素。

钛合金的缺点是：有氢脆倾向；在高温下与气体特别与氧发生

活性反应；耐磨性不高；切削加工费时；各种半成品的压力加工通常都必须在热态下进行。

在现阶段，钛及钛合金仍然比较昂贵，主要原因是冶金过程复杂。但是，通过不断地改进钛及钛合金的生产，成本逐渐降低。钛的冶金成就能够从根本上扩大工业钛合金的品种以及提高它们的机械性能的稳定性的。人们之所以对钛发生兴趣，还因为钛在自然界分布广泛。现在已经具备客观条件，可以把钛合金作为结构材料在许多国民经济部门予以扩大应用。

热态体积变形，特别是模锻和挤压广泛应用的工艺方法是钛合金半成品生产中最普遍采用的方法。热模锻和挤压能够制成各种各样形状的零件，其重量可从几克到几百公斤。

自 Л. А. 尼克里斯基 (Л. А. Никольский) 著的《钛合金毛坯热模锻》一书问世以来，已经十余年了。在这段时间里，出现了许多新的钛合金压力加工工艺，如高速锤模锻、 β 模锻、等温变形等。钛的挤压也获得了积极发展。因此，有必要把钛及钛合金的热态变形以及伴生的工艺方法特点予以系统地概括地介绍。本书还包括一些最新的科研和生产成果。

目 录

第一章 钛及钛合金概述	1
1. 钛在自然界的分布	1
2. 组织、化学成分和机械性能	1
3. 物理性质和化学性质	16
4. 工艺性能	23
5. 钛合金的应用	32
第二章 热压力加工的热机械规范	37
1. 加热时的组织和机械性能	37
2. 温度和变形程度对晶粒度的影响	47
3. 钛合金的变形性	52
第三章 自由锻与模锻	70
1. 选择制取毛坯方法的技术经济依据	70
2. 原始毛坯的切割和准备	71
3. 加热	73
4. 摩擦与润滑	81
5. 自由锻	91
6. 模锻	95
7. 环形毛坯的制造	125
8. 切边	136
9. 热处理	137
10. 清理工序	143
第四章 挤压	147
1. 概述	147
2. 金属流动的性质	149
3. 热效应	151
4. 挤压条件对产品组织及性能的影响	154
5. 热机械规范	157
6. 挤压工艺	159

7. 工艺过程举例	164
第五章 模具的设计、制造及使用	173
1. 模具的设计	173
2. 模具预热	173
3. 模具钢	181
4. 模具制造工艺	186
5. 铸造模具的应用	190
6. 模具的使用	192
第六章 等温变形	196
1. 方法的实质及可能性	196
2. 装备、设备及工具	201
3. 工艺参数的计算	213
4. 模锻零件的工艺特点及例子	259
第七章 模锻件的结构要素及精度	272
1. 结构要素	272
2. 余量与公差	279
第八章 安全技术	296
参考文献	299

第一章 钛及钛合金概述

1. 钛在自然界的分布

钛是地壳中分布最广的元素之一，超过了碳、氯、氟、硫和磷，居第十位。与其它结构材料相比，钛排在铝（8.3%）、铁（5%）、镁（2.1%）之后，占第四位（0.63%）。

钛主要以金红石（ TiO_2 ）和钛铁矿（ FeOTiO_2 ）形式大量储存在地壳中。金红石通常埋藏在河砂中，而钛铁矿主要埋藏在坚硬的岩层中。国外已经勘探的最大的矿产地是在美国、澳大利亚、印度、加拿大。

苏联也拥有大的钛矿石原料基地。

2. 组织、化学成分和机械性能

钛属于多晶型金属，有两种同素异构晶型。低于 882.5°C 为低温 α 晶型，呈密排六方晶格；在 882.5°C 至熔点为稳定的高温 β 晶型，呈体心立方晶格。

α 钛六方晶格的 c/a 轴之比略低于密排晶格的理想值（1.663）。按照不同研究者所得到的结果，晶格常数的平均值是： $a = 2.9503 \text{ \AA}$ ， $c = 4.6831 \text{ \AA}$ ， $c/a = 1.5873$ 。 β 钛的体心晶格常数在 900°C 为 $3.313 \text{ \AA}$ ，按线性膨胀系数换算，在室温则为 $3.283 \text{ \AA}$ 。不同的研究者测得的晶格常数各不相同，其原因是被研究的金属的纯度不同以及氧、氮和碳等杂质的影响。

由于合金元素对 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 同素异构转变温度的影响不同，钛的状态图可分为三类（图 1）。

属于第一类状态图的合金系〔图 1（a）〕是，合金元素可提高 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 同素异构转变温度即合金元素可溶于钛的低温 α 晶型。能够扩大 α 相稳定区的元素有铝、氧、碳和氮。这些合金元素叫

做 α 稳定剂。它们的溶解度极限非常高：氧在 40% (原子) 以下；氮在 20% (原子) 以下。碳在 α 相中的溶解度不大。基本的 α 稳定剂是铝，它的含量在现代合金中达到 8 %。

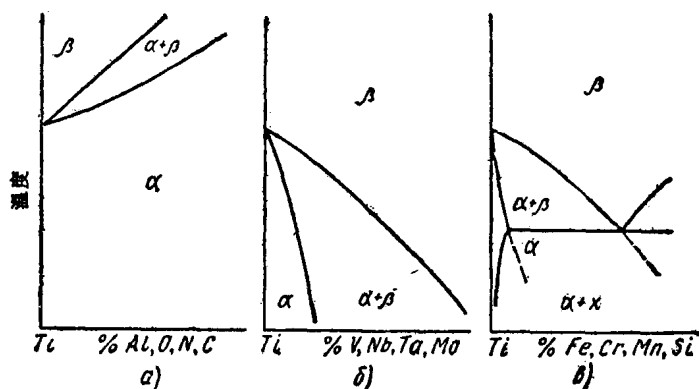


图 1 钛的状态图

属于第二类状态图的合金系是，合金元素可降低 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 同素异构转变温度并且溶解在钛的高温 β 晶型中〔图 1 (b)〕。

能够扩大体心立方晶格的 β 相区的元素是难熔的过渡族金属：钒、铌、钽、钼和钨。这些合金元素的晶格与 β 钛的完全相同，叫做同晶 β 稳定剂。

属于第三类状态图的合金系〔图 1 (c)〕是，合金元素可降低 $\alpha \rightleftharpoons \beta$ 同素异构转变温度，高温相分解成共析体混合物 $\alpha + x$ (式中 x 为金属间化合物)。这些元素叫做共析体型 β 稳定剂，它们是锰、铁、镍、硅、铜等。

对 α 和 β 相溶解区的影响较小的合金元素，叫做中性强化剂，它们是锡、锆和铪。

在对钛合金进行比较时，要以斯·格·格拉尊诺夫 (С. Г. Глазуновым) 提出的组织类型的分类作为基础。

按照这种分类，钛合金可分为：

- 1) α 钛合金, 它的组织为 α 相,
- 2) $(\alpha + \beta)$ 合金, 它的组织为 $(\alpha + \beta)$ 相,
- 3) β 合金, 它的组织为机械稳定 β 相 (在这三种情况下, 相的组成都是指室温的)。

近年来, 应用得最广泛的是有少量 β 相且保持纯 α 合金全部基本特性的 α 钛合金。少量的 β 相可改善工艺性和机械性能。这种合金叫做近 α 合金。此外, 还出现了以少量 α 相作强化相通过淬火和时效强化的 β 基钛合金。这种合金叫做近 β 合金, 其性能与纯 β 合金的性能相近^[12]。

表 1 所列苏、美、英工业钛合金的化学成分。各类钛合金半成品的机械性能列于表 2 至表 9。

钛合金的显微组织按其各自的特点分为九种 (图 2 和图 3)。

第 1、2、3 种组织为等轴组织, 是在低于 $(\alpha + \beta) \rightleftharpoons \beta$ 同素异构转变点的温度下变形时形成的。这类组织具有比较高的塑性和疲劳强度极限以及最低的缺口敏感性。对于在振动载荷条件下工作的零件, 这种组织比较理想。

第 4、5、6 种组织是在变形始于转变点以上的温度而终止于两相区的条件下形成的。这种组织的特点是针状网篮结构。有网篮状组织的合金具有最高的热强性和抗蠕变指标, 并且塑性、疲劳强度和热稳定性配合良好。这种组织最适用于在工作过程中承受拉应力的零件。

第 7、8、9 种组织是在 β 区热加工时形成的, 其特点是初生 β 相晶粒粗大, 晶界清晰, 晶粒内部为粗针状结构。这种组织为过热的金属所固有, 它的特点是塑性低、持久强度低、疲劳强度低、在振动载荷下对缺口敏感并且热稳定性低。这类组织不能用热处理校正, 只能通过 $(\alpha + \beta)$ 区进行第二次变形予以修复。

钛合金的低倍组织按十级标准进行评定 (1-10, 图 4)。为了改善钛合金产品的机械性能及使用性能, 应该使低倍组织的级数最低而且均质性最大。

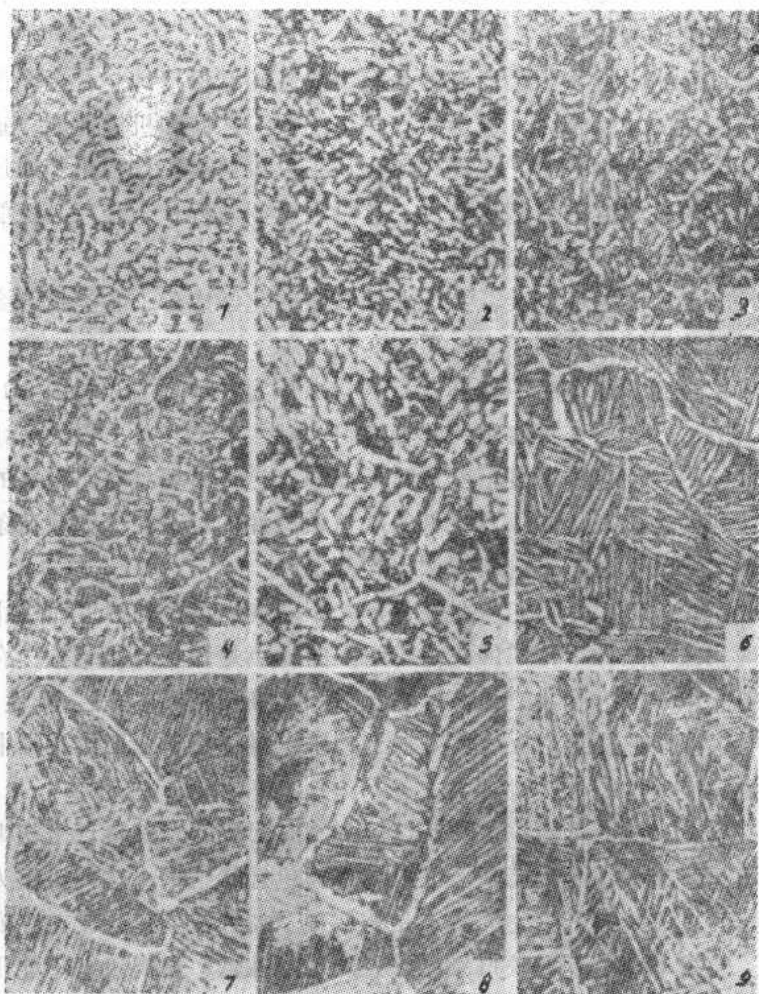


图2 双相钛合金显微组织标准, $\times 500$

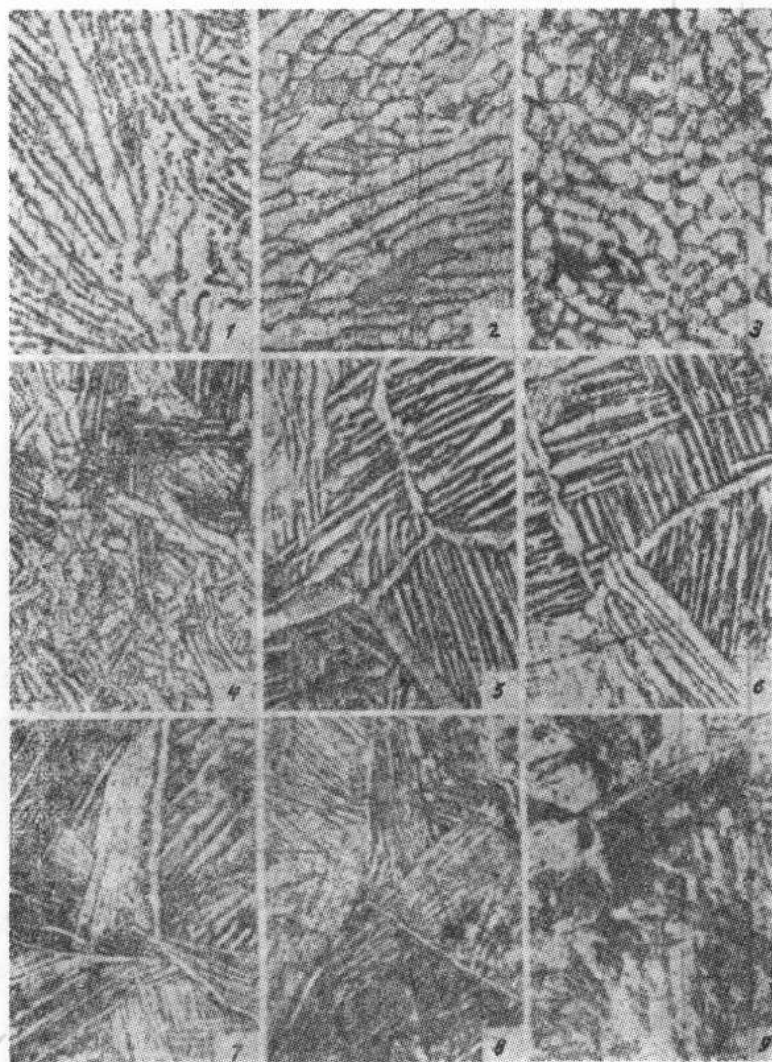


图3 单相钛合金显微组织标准, $\times 500$

表 1 钛合金的化学成分 (%) (表列为基本元素, 以钛为基)⁽¹⁾

合金牌号	组织	Al	Mn	Mo	V	Zr	Si	Cr	其	它
苏联的合金										
BT1-00	α	—	—	—	—	—	—	—	—	—
BT1-0		5	—	—	—	—	—	—	—	2.5Sn
BT5		5	—	—	—	—	—	—	—	—
BT5-1	α	—	—	—	—	—	—	—	—	—
OT4-0	近α	1	1.5	—	—	—	—	—	—	—
OT4-1	近α	1	1.5	—	—	—	—	—	—	—
OT4	近α	3	1.5	—	—	—	—	—	—	—
BT4	近α	4	1.5	—	—	—	—	—	—	—
OT4-2	近α	6	1.5	—	—	—	—	—	—	—
AT3	近α	3	—	—	—	—	—	—	—	1.5(Fe+Cr+Si+B)
AT4	近α	4	—	—	—	—	—	—	—	1.5(Fe+Cr+Si+B)
BT18	近α	6	—	1	—	11	—	—	—	1Nb
BT20	近α	6	—	1	1	2	—	—	—	—
BT6C	α+β	4.5	—	—	3.5	—	—	—	—	—
BT6	α+β	6	—	—	4	—	—	—	—	—
BT8	α+β	6.5	—	3.5	—	—	0.2	—	—	—
BT9	α+β	6.5	—	3.5	—	2	0.2	—	—	—
BT3-1	α+β	5.5	—	2	—	—	0.2	2	—	1Fe
LT14	α+β	4	—	3	1	—	—	—	—	—

[illegible]

(续)

合 金 牌 号	组 织	Al	Mn	Mo	V	Zr	Si	Cr	其 它
Ti-8Mn	$\alpha + \beta$	—	8	—	—	—	—	—	—
B-120VCA	近 β	3	—	—	13	—	—	11	—
Ti-12Mo-(4~8)Sn	近 β	—	—	12	—	—	—	—	(4~8)Sn
Ti-1Al-8V-5Fe	近 β	1	—	—	8	—	—	—	5Fe
英国的合金									
Ti-115, Ti-120	α	—	—	—	—	—	—	—	—
Ti-130, Ti-150		—	—	—	—	—	—	—	—
Ti-160		—	—	—	—	—	—	—	—
Ti-5Al-2.5Sn	α	5	—	—	—	—	—	—	2.5Sn
Ti-2Cu	α	—	—	—	—	—	—	—	2Cu
Hy-55	α	3	—	—	—	5	0.5	—	6Sn
IMI314C	近 α	2	2	—	—	—	—	—	—
Hy-60	近 α	3	—	2	—	5	0.5	—	6Sn
IMI679	近 α	2.5	—	1	—	5	0.25	—	11Sn
IMI314A	$\alpha + \beta$	4	4	—	—	—	—	—	—
IMI318A	$\alpha + \beta$	6	—	—	4	—	—	—	—
Hy50	$\alpha + \beta$	4	—	5	—	—	0.5	—	2Sn
IMI680	$\alpha + \beta$	2.25	—	4	—	—	0.2	—	11Sn
IMI684	$\alpha + \beta$	6	—	—	—	5	0.2	—	1W
IMI205	近 β	—	—	15	—	—	—	—	—

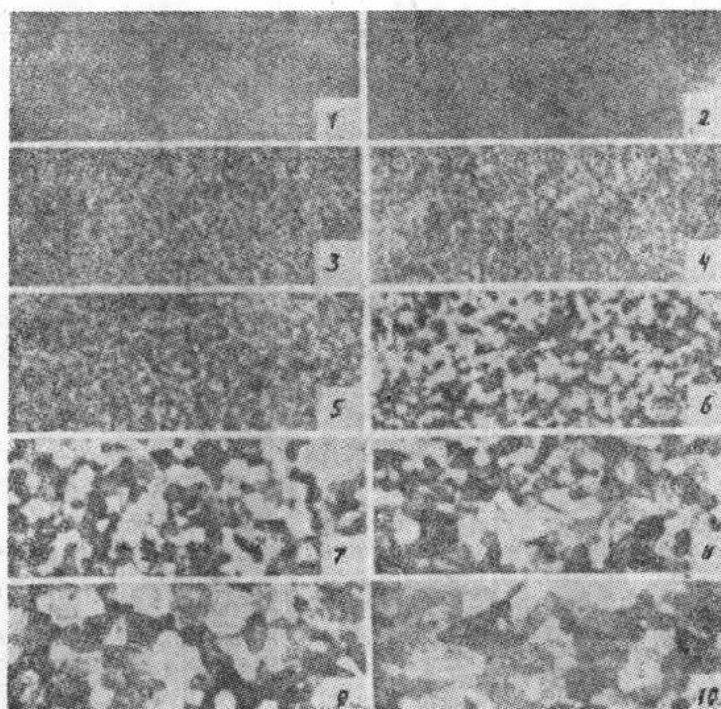


图4 钛合金低倍组织标准

表 2 锻棒和挤压棒的机械性能
(直径或方长为65~100毫米, 室温)⁽²⁾

合 金	热 处 理	σ_B 公斤力/毫米 ²	δ	ψ	a_H 公斤 力·米/ 厘米 ²	压痕直径
			%			(10/3000)毫米
BT1-00	退 火	30~45	25	55	12	4.9~5.5
BT1-0		40~55	20	50	10	4.7~5.2
OT4-0		50~65		45	7	3.8~4.3
OT-4		70~90	10	30	4	3.5~4.0
OT4-1		60~75	15	35	4.5	3.8~4.2
OT4-2		95~110	8	25	3	3.3~3.7
BT-4		85~105	10	30	3.5	3.4~3.8
BT3-1		100~120		25	3	3.3~3.7
BT5		75~95				4
BT5-1		80~100	30	3	3.3~3.7	
BT6		92~107				
BT6	淬火+时效	110~125	参 考 6	值 20	2.5	3.1~3.4
BT6C	退 火	85~100	10 参 考	25 值	4	3.4~3.8
BT6C	淬火+时效	105~120	6	20		3.2~3.4
BT8	退 火	100~120			3	
BT9		105~125	9	25		3.3~3.5
BT14		90~110	10	35	5	3.4~3.8
BT14	淬火+时效	不小于 110	4	8	2	3.5~3.4
BT16	淬火+时效	105~125	5	20.0	—	—
BT18	退 火	95	8		2	—

注：在纵向切取试样。