Ti-6 Al-4 V 板の機械的性質におよぼす熱間圧延温度 およびクロス圧延の影響

前 義 治* 竹 内 庸*

Yoshiharu Mae and Yo Takeuchi : The Effects of Hot Rolling Temperature and Cross Rolling Condition on the Mechanical Properties of Ti-6 Al-4 V Sheets.

Ti-6 Al-4 V alloy was hot rolled in the β and $\alpha + \beta$ ranges, and the effects of cross rolling in the β range, rolling temperature and cross rolling in the $\alpha + \beta$ range on the tensile properties, bend properties, microstructures, anisotropy of hardness and the textures were examined.

Hot rolling in the β range was carried out at the early rolling process. At the finishing rolling process the finishing temperature was fixed at 800°C by taking the amount of β -phase into consideration and the heating temperature was varied from 900 to 950°C. Tensile properties, bend properties, microstructures, hardness and textures were observed in the specimens subjected to the following processes :

- (a) straight rolling in the β range, followed by straight rolling in the $\alpha + \beta$ range
- (b) straight rolling in the β range, followed by cross rolling in the $\alpha + \beta$ range
- (c) cross rolling in the β range, followed by straight rolling in the $\alpha + \beta$ range
- (d) cross rolling in the β range, followed by cross rolling in the $\alpha + \beta$ range

The results are as follows :

(1) In this alloy the alignment of [0002] axes are observed not only in the normal direction but also in the rolling and transverse directions of the sheet. The sheet which was straight-rolled in the $\alpha + \beta$ range shows a higher pole intensity in the transverse direction than that in the rolling direction and a large planar anisotropy in the yield and tensile strengths. On the other hand, the sheet which was cross-rolled in the $\alpha + \beta$ range shows a nearly equal intensity in the rolling and transverse directions and little planar anisotropy in the yield and tensile strengths.

(2) Thus, an adequate manufacturing process for this material is concluded to be a process that involves cross rolling at an appropriate temperature in the $\alpha + \beta$ range.

(Received July 29, 1974)

I. 緒 言

Ti-6 Al-4 V 合金は主として航空機産業に広く使用されているが、この合金に関する研究は強度と熱処理に関するものが多く、製造条件特に板材の製造条件に関するものは極めて少ない。しかし品質のよい Ti-6 Al-4 V 合金板を製造するには多くの問題点が予想される。板製造にあたっては適正な熱間圧延温度を設定する必要があるが、この合金は常温から約 1000°C までは稠密六方晶の α 相と体心立方晶の β 相が共存し、約 1000°C 以上では β 単相となることが知られている⁽¹⁾。ここでは材料の機械的性質におよぼす熱間圧延温度および圧延方向の影響を試験することを目的とした。

II. 予 備 実 験

圧延温度と組織との関係を把握する目的で、 $\alpha + \beta$ 領域

の 900 から 950, 970 および 990°C までの圧延温度で圧延を行なった。供試材としては 900°C の圧延温度で 20 mm 厚から熱間圧延した厚さ 7 mm の板を使用した。供試材の化学成分を **Table 1** に示した。圧延前の試料寸法は幅 150 mm、長さ 200 mm で、炉から取り出し後はすばやく、供試材の圧延方向にストレート圧延を行ない、パス回数は 5 ないし 6 回で、1 回加熱で厚さ 3 mm の熱間圧延板を作った。参考のため圧延終了温度を赤外線輻射温度計で測定したが、圧延温度が低いほうからそれぞれ 550, 550, 550 および 630°C であった。圧延後は表面調整後 800°C × 1 hr の真空焼鈍を行なった。その状態での各試料の組織を

Table 1 Chemical composition of specimen.

Elements	Fe	N	O	H	Al	V	C
wt%	0.069	0.0063	0.128	0.0011	6.13	4.27	0.011

* 三菱金属株式会社中央研究所 (Central Research Laboratory, Mitsubishi Metal Corp., Ohmiya)

Photo.1 Microstructures of hot rolled specimens in annealed condition. ($\times 500 \times \frac{4}{5}$)
 (a) rolled at 900°C, (b) rolled at 950°C, (c) rolled at 970°C, (d) rolled at 990°C

Photo.1 に示した、圧延温度が 970°C までの試料では、通常の α 相の初晶と β 相との混合組織であるが、990°C の試料では β 加熱材特有の basket weave structure を呈している。これらの結果から、良好な圧延組織を得るためには、安全率をみて加熱温度はおおよそ 950°C までとすべきであることがわかる。次に、組織以外の諸性質特に集合組織には熱間圧延中の α 相と β 相の存在量が問題となるが、Fig.1 に 800°C 以上から β transus までの β 相の存在量を示した⁽¹⁾。これによれば β 相は 800°C から急激に増加することがわかる。したがって $\alpha + \beta$ 領域圧延での集合組織形成におよぼす β 相量の影響をみるためには、圧延

終了温度を 800°C 付近とし、加熱温度は上述の組織を考慮して 950°C までとすることが妥当であることがわかる。

III. 本 実 験

本実験では粗圧延段階での β 領域でのストレートおよびクロス圧延の影響、および引き続いての仕上げ圧延段階での $\alpha + \beta$ 領域の熱間圧延温度およびストレートまたはクロス圧延の影響を検討することを目的とした。供試材としては、予備実験と同一組成の厚さ 100 mm のスラブから 22 mm まで 1050°C から 800°C の温度範囲で圧延した素材を用いた。したがって本報ではこの第 1 回目の圧延を便宜上「熱圧 1 伸」と呼び、それ以降の圧延を 2 伸、3 伸および 4 伸と呼ぶこととする。ここでは厚さ 3 mm の熱延板を得ることを目標とし、Fig.2 に示す工程で圧延を行なった（ここで、ストレート圧延とは前段階での圧延方向に平行に連続したパスの圧延を行なうことを、クロス圧延とは前段階の圧延工程での圧延方向に直角に連続したパスの圧延を行なうことをいう）。圧延素材寸法は幅 150 mm、長さ 200 mm でロール径 260 mm、圧延速度は 12 m/min であった。熱圧 2 伸で β 領域圧延におよぼすストレートおよびクロス圧延の効果を検討するために、1030°C の加熱温度でストレートおよびクロス圧延の二つの試料グループに分けた。圧延終了温度は 800°C を目標とし、実際の圧延終了温度は赤外線放射温度計で測定した。3 伸および 4 伸の圧延終了温度もすべて 800°C を目標とし、実測値を Fig.2 に示した。2 伸での仕上げ板厚は、3 伸でのストレート圧

Fig.1 Volume percent of β phase at high temperatures.

Raw material (22mm thick)												
2nd stage hot roll												
heat temp (°C)	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030	1030
final temp (°C)	800	800	780	810	800	800	810	800	810	830	830	820
rolling direction	straight	straight	straight	straight	straight	straight	cross	cross	cross	cross	cross	cross
final thickness (mm)	13.5	10.9	13.6	10.7	13.4	11.4	14.4	14.1	14.2	13.6	13.6	13.4
3rd stage hot roll												
heat temp (°C)	900	900	930	930	950	950	900	900	930	930	950	950
final temp (°C)	790	780	800	770	810	800	760	830	780	760	820	760
rolling direction	straight	cross	straight	cross	straight	cross	straight	cross	straight	cross	straight	cross
final thickness (mm)	5.7	6.2	6.8	6.8	5.9	5.9	5.8	6.0	6.1	6.4	6.0	6.2
4th stage hot roll												
heat temp (°C)	900	900	930	930	930	930	900	900	930	930	930	930
final temp (°C)	850	810	840	820	750	830	790	800	840	830	830	850
rolling direction	straight	straight	straight	straight	straight	straight	straight	straight	straight	straight	straight	straight
final thickness (mm)	3.0	3.0	3.0	3.1	3.1	3.2	3.2	3.4	3.1	3.1	3.3	3.3
annealing	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr	750°Cx1hr
sample No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.11	No.12	No.14

Fig.2 Rolling pass schedule and sample No.

延材はほぼ 13 mm 厚, クロス圧延材は幅出しの関係からほぼ 11 mm 厚とした。次に 3 伸以降は仕上げ圧延とし, $\alpha+\beta$ 領域で圧延を行ない, $\alpha+\beta$ 領域での加熱温度およびクロス圧延の影響を調べるために, 加熱温度を予備実験の結果から 900, 930 および 950°C の 3 種類とし, それぞれストレートおよびクロス圧延を行なった。加熱ごとに 2 ないし 3 回のパスを行ない仕上げ板厚をほぼ 6 mm とした。その後圧延材の表面を調整し 3 伸と同一条件で 4 伸を行なった。ただ 3 伸で圧延温度の高い 950°C 圧延の試料については, 組織の改善をはかる意味で 930°C の圧延を行なった。板厚 5 mm 以下の圧延では 1 パスごとに再加熱を行なった。したがって加熱回数は 5 から 6 回を要した。仕上げ板厚は 3 mm とした。これらの圧延板を表面調整後全試料に共通に 750°C×1 hr の真空焼鈍を施した。これらの試料について, 引張試験, 曲げ試験を行ない, また組織,

硬さおよび集合組織を測定した。また本合金の引張性質および曲げ性質は米国 MIL 規格⁽²⁾によって規格化されているため, 本実験結果と対照した。

IV. 実験結果

1. 引張試験

幅 6 mm, 標点距離 25 mm の試験片で 0.2% 耐力まで 0.2 mm/min, その後破断まで 5 mm/min の引張速度で引張試験を行なった。Fig.3 に熱圧 2 伸および 3 伸の圧延方向が同一の試料グループごとに熱圧 3 伸の圧延温度と引張性質との関係を示した。これからすべての試料とも引張性質は MIL 規格を満足することがわかる。ただストレート圧延とクロス圧延のちがいに引張性質の絶対値およびその面内異方性はたいへん異なる。すなわち $\alpha+\beta$ 領域の圧延でストレート圧延したものは耐力および引張強さ

Fig.3 Relationship between tensile properties and rolling temperature of 3rd stage hot rolling.

- (a) 2nd stage hot rolling : straight rolling 3rd stage hot rolling : straight rolling
- (b) 2nd stage hot rolling : straight rolling 3rd stage hot rolling : cross rolling
- (c) 2nd stage hot rolling : cross rolling 3rd stage hot rolling : straight rolling
- (d) 2nd stage hot rolling : cross rolling 3rd stage hot rolling : cross rolling

に大きな面内異方性が認められる。これに対して $\alpha+\beta$ 領域の圧延でクロス圧延したものはこれらの面内異方性は小さくなり、ある一定の圧延温度ではほぼ消失する。また β 領域でのクロス圧延の効果は $\alpha+\beta$ 領域よりも小さいことも認められる。

2. 曲げ試験

MIL 規格に従って、幅 30 mm の試験片で曲げ角度 75° の V 字型クローズダイにより曲げ試験を行ない最小曲げ半径を求めた。結果を Fig. 4 に示した。MIL 規格では厚さの 3 mm 板については $5T$ (T : 試料の板厚) 以下の曲げ半径が規定されているが、試料 2 の直角方向を除いてすべて規格を満足している。

3. 組織および硬さ

Photo. 2 に各試料の最終焼鈍状態の組織を示した。この実験ではおよそ 13 mm あるいは 11 mm まで β 領域の圧延を行なったため、厚さ 3 mm の段階で若干 β 加熱の影響が残っているが、 α 粒は予備実験に比較して微細である。また 900°C から 950°C までは圧延温度による組織の差はほとんど認められない。

Fig. 4 Relationship between minimum bend radius and rolling temperature of the 3rd stage hot rolling.

- (a) 2nd stage hot rolling : straight rolling
3rd stage hot rolling : straight rolling
- (b) 2nd stage hot rolling : straight rolling
3rd stage hot rolling : cross rolling
- (c) 2nd stage hot rolling : cross rolling
3rd stage hot rolling : straight rolling
- (d) 2nd stage hot rolling : cross rolling
3rd stage hot rolling : cross rolling

硬さは圧延面(R面)、圧延方向に平行な側面(L面)および圧延方向に垂直な側面(T面)についてビッカース硬さを測定した。Fig. 5 に硬さと熱間圧延3伸の圧延温度との関係を示した。これから、多くの場合圧延面の硬さがL面よりも小さく、T面との中間程度であること、また試料4では硬さの異方性はほとんどないことが認められる。

4. 集合組織

これらの試料のうち試料 1, 2, 4, 8 および 12 について、Cu ターゲットによる反射法と Mo ターゲットによる透過法で(0002)面の極点図を作製した。その結果を Fig. 6 に示した。これらの試料においては α 角度の小さい範囲に鋭い(0002)面の集積が存在することが特徴的である。

V. 考 察

以上の結果から、本実験の条件によれば MIL 規格を満足する板の製造が可能であることが判明したが、本実験条件下でも製造条件によって集合組織、引張性質および曲げ性質にかなりの相違がみられる。またこれらの機械的性質の相違は基本的に集合組織の相違に由来すると考えられるため、以下それらの関係について検討した。

(1) 集合組織と機械的性質

集合組織の測定結果から、この合金の集合組織は [0002] 軸が板面法線、直角方向および圧延方向の 3 方向に集積した三つの基本的な優先方位に分類される。機械的性質および硬さは、これらの優先方位の相対的な強さに影響されている。板面法線方向の集積はともに小さく、直角方向の集積が圧延方向よりも大きい集合組織は試料 1 および 12 にみられるが、この場合の耐力は直角方向に比べて圧延方向が小さく、かつその差も大きい。引張強さも同一の傾向をもつ。硬さも L 面と T 面の差が大きい。これに対して試料 2, 4 および 8 のように [0002] 軸の圧延方向集積の直角方向集積に対する相対的強度が増加するにつれて、耐力、引張強さおよび硬さの異方性は減少する傾向にある。曲げ性質と集合組織との関係については、最小曲げ半径の面内異方性などの理由を含め、明確な対応関係は認められない。

(2) 集合組織と圧延条件

この合金の集合組織に特徴的なことは、[0002] 軸が板面法線方向のみならず、圧延方向および直角方向に集積していることである。これらの集合組織の形成機構については、本実験結果からは明らかでないが、測定結果にもとづいて集合組織と圧延条件との関連について述べる。試料 1 および 12 にみられる圧延方向に比して直角方向の集積が強い優先方位は、 $\alpha+\beta$ 領域でストレート圧延

Photo.2 Microstructures of hot rolled specimens in the annealed condition. ($\times 500 \times 35$)

(a) Sample No.1, (b) Sample No.2, (c) Sample No.3, (d) Sample No.4,
 (e) Sample No.5, (f) Sample No.6, (g) Sample No.7, (h) Sample No.8,
 (i) Sample No.9, (j) Sample No.11, (k) Sample No.12, (l) Sample No.14

Fig.5 Relationship between anisotropy of the Vickers hardness and rolling temperature of the 3rd stage hot rolling.

(a) 2nd stage hot rolling : straight rolling 3rd stage hot rolling : straight rolling
 (b) 2nd stage hot rolling : straight rolling 3rd stage hot rolling : cross rolling
 (c) 2nd stage hot rolling : cross rolling 3rd stage hot rolling : straight rolling
 (d) 2nd stage hot rolling : cross rolling 3rd stage hot rolling : cross rolling

Fig.6 (0002) pole figures of hot rolled specimens in the annealed condition.

したものにも共通している。このタイプの集合組織をもつ試料は耐力および引張強さの面内異方性が大きい。Fig.3 (a)および(c)にみられる引張性質から、この傾向は900から950°C圧延までのストレート圧延に共通していると考えられる。また、Fig.3(a)と(c)との比較から、2伸での β 領域のクロス圧延の影響は小さいといえる。これに対して $\alpha+\beta$ 領域でのクロス圧延は集合組織および機械的性質に大きな影響をもつ。すなわち、試料2, 4および8にみられるように、クロス圧延によって[0002]軸の直角方向と圧延方向への集積はほぼ等しくなる。またストレート圧延の試料1とクロス圧延の試料2を比較した場合、同一の圧延温度でも[0002]軸の板面法線方向への集積がクロス圧延の場合やや増大する傾向がある⁽³⁾。また同じクロス圧延でも、圧延温度が高い試料4では試料2に比較して板面法線方向への[0002]軸の集積は小さい。これは圧延中に存在する α 相がより少ないためと考えられる。

VI. 結 言

この実験により、Ti-6 Al-4 V合金板の集合組織の変化を通じての圧延条件と板の機械的性質の関係についてはあ

る程度理解され、引張性質、曲げ性質、組織などの良好な板の工業的な製造条件は確立されたと考えられる。結果は次のように要約される。

(1) この合金では、[0002]軸の板面法線方向への集積のほか直角および圧延方向への集積が認められる。 $\alpha+\beta$ 領域でストレート圧延したものは圧延方向に比し直角方向に大きな集積がみられ、耐力および引張強さの面内異方性は大きい。これに対して $\alpha+\beta$ 領域でクロス圧延したものは両者の集積は同程度となって、耐力および引張強さの面内異方性は小さい。

(2) したがって、工業的な製造方法は $\alpha+\beta$ 領域での適当な圧延温度でのクロス圧延を含む工程となる。

文 献

- (1) P.J.Fopiano, M.J.Bever and B.L.Averbach: Trans.ASM, **62**(1969), 324.
- (2) Military specification: Titanium and Titanium alloy, MIL-T-9046 F.
- (3) J.M.Fitzpatrick, F.A.Crossley and R.F.Lewis: Metals Eng. Quart., **12**(1972), 27.