

工業用純チタン薄板の張出性

論文

鋸屋 正喜*・私市 優*・石山 成志*

Stretchability of Commercially Pure Titanium Thin Sheet

Masayoshi OGAYA, Masaru KISAICHI and Seishi ISHIYAMA

Synopsis :

Stretchability of the commercially pure titanium thin sheet which is used for plate type heat exchanger was determined in comparison with the tensile properties.

In stretch forming the strain hardenability in the transverse direction, in which the maximum principal strain is oriented to the transverse direction, is greater than that in the longitudinal direction, while in uniaxial tension the strain hardenability is much smaller in the transverse direction than that in the longitudinal direction. Thus, the stretchability is controlled by the poorer ductility resulting from the smaller strain hardenability in stretch forming in the longitudinal direction.

In the longitudinal direction the strain hardenability increases with increasing grain size in both uniaxial tension and stretch forming. Therefore, the stretchability is improved since the longitudinal ductility in stretch forming increases with increasing grain size.

The behavior of strain hardening is satisfactorily explained by the amount of the twins produced during plastic deformation. Namely, higher density of deformation twin produced in both longitudinal uniaxial tension and stretch forming in the transverse direction results in greater strain hardenability. Moreover, the density of twin produced in both deformation modes increases with increasing grain size in the longitudinal direction.

1. 緒 言

工業用純チタンは一般的に高い r 値を有することから深絞り性が優れていることは従来より指摘されているが、実際の需要分野を見ると深絞り成形の用途は比較的少なく、プレートタイプの熱交換器(以下、熱交プレートと略称する)に代表される張出成形の用途がむしろ多い。この熱交プレートは板厚 0.6 mm~1.0 mm の薄板を完全張出しにより波板に成形するもので、熱交率を高めるため大きな成形深さと複雑な形状の張出成形が要求される。このため材料は変形限界に近い苛酷な成形を強いられ、純チタン板では割れが問題とされてきた。純チタン板の張出性は、酸素含有量が低いほど、また結晶粒径が大きいほど良好となることは良く知られており、したがって、熱交プレートに対しては、通常、粒径を適正に調整した JIS 1 種に相当する軟質材が用いられている。

純チタン薄板のもう一つの特徴として、軟鋼板などに比べ引張特性の面内異方性が極めて大きいことが挙げられる。このため、当材料の張出性や他のプレス成形性もこの大きな面内異方性の影響を強く受けることは十分に予想される。したがって、この挙動を正確に把握するこ

とは、純チタン薄板のプレス成形を成功させる上で重要と言える。しかしながら、この点についてはかならずしも明瞭にされていないため、これが純チタンがプレス成形材として難加工性と評価される一つの要因となつていると思われる。

以上のような観点から、本報は熱交プレート素材として供給される純チタン薄板の張出し性、特にその変形特性における面内異方性の特徴を、まず、引張特性および結晶粒径との関連で整理して示し、次いで、これらの挙動に対して変形機構と加工硬化性の面から説明を試みた。

2. 熱交プレートの変形様式

Fig. 1 に熱交プレートの一例と、変形様式を示した。熱交プレートの変形は大別して二つに分けられ、部位 A は通常のエリクセン加工に類似した等 2 軸張出変形に近く、一方部位 B は平面歪み変形となつているが、いずれの部位も変形は張出領域 ($\epsilon_x > 0$, $\epsilon_y > 0$) で進行する。

3. 供 試 材

試験に供した材料は、JIS 1 種に相当する 0.6 mm 厚

昭和 57 年 9 月日本金属学会秋期大会にて発表 昭和 60 年 8 月 13 日受付 (Received Aug. 13, 1985)

* 日本ステンレス(株)直江津研究所 (Naoetsu Laboratory, Nippon Stainless Steel Co., Ltd., 2-12-1 Minato-cho Joetsu 942)

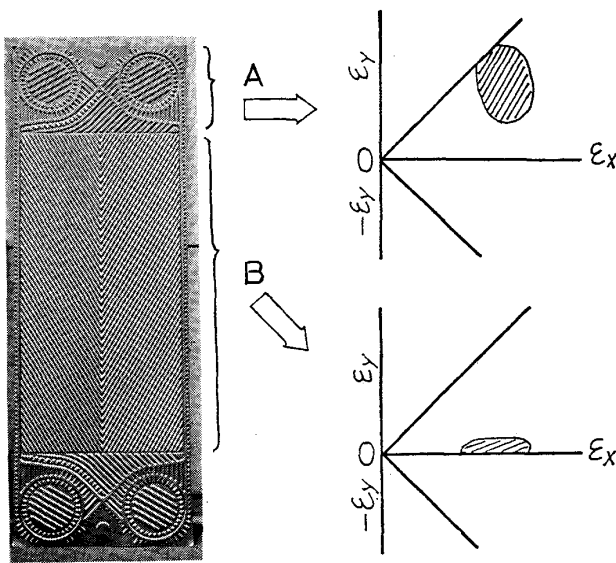


Fig. 1. Deformation mode of plate type heat exchanger.

Table 1. Chemical composition (wt%).

Fe	O	C	N	H
0.03	0.06	0.01	0.01	0.0015

冷間圧延焼鈍板で、最終焼鈍条件を変えることにより、結晶粒径を 15~70 μm の範囲で4水準に調整した。供試材の化学成分を Table 1 に示した。

4. 実験方法

4.1 単純引張り試験

単純引張り試験は JIS 5 号試験片を用い、インストロン型試験機で行った。引張速度は 0.2% 耐力までは 0.5%/min, 0.2% 耐力から破断までは 25%/min とした。

4.2 張出性試験

張出性試験としてエリクセン試験、液圧バルジ試験(真円、楕円)を行なった。真円バルジは 100φ, 楕円バルジは長軸 100 mm, 短軸 50 mm の金型を用いた。

4.3 変形限界線測定

ビード付 20φ 鋼球張出し工具を用い、Fig. 2 に示す方法で変形限界線を求めた²⁾。

等2軸張出変形はビードにより材料の流入を完全に拘束した状態で、ポンチ側を高潤滑にすることによって得た。不等2軸領域の張出し変形は短冊状試験片を用い、この試験片の幅を変えることによって求めた。短冊状試験片の幅を小さくするとともに幅方向の拘束が弱まるため、変形様式は等2軸張出し領域から平面歪み領域へ変化する。このように張出領域で種々の変形様式の成形を

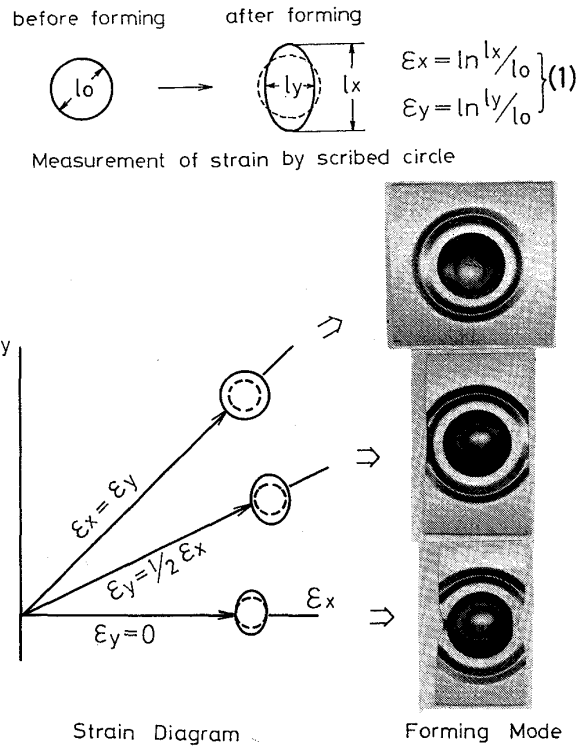


Fig. 2. Forming limit diagram techniques.

行い、それらの破断部、くびれ部およびこれらの近傍の歪みを測定し、変形限界線を作成した。歪み量は電解腐食法でマーキングした直径 5 mm のスクライブドサークルの変形量から、Fig. 2 の(1)式に従って求めた。

4.4 n 値測定

張出成形での加工硬化挙動を詳細に知るため、本試験では通常の単純引張り試験で得られる n 値のほか、楕円バルジ成形における n 値を測定した。

単純引張りでの n 値は最高荷重を示す歪みとそれより 5% 前の歪みの間で測定した。

楕円バルジ成形での n 値は、以下に述べるような方法で求めた³⁾⁴⁾。成形時の頂点近傍の主応力 σ_1, σ_2 は(2)式により求め、主歪み ϵ_1, ϵ_2 は変形限界歪みの測定と同様に直径 5 mm のスクライブドサークルの変形量から求めた。(2)式で P は成形圧、t は板厚、 ρ_1 および ρ_2 はそれぞれ短軸方向、長軸方向の曲率である。曲率の測定は R ゲージを用いた。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{P\rho_1}{2t} \cdot (2 - \rho_1/\rho_2) \\ \sigma_2 &= \frac{\rho_2}{2\rho_2 - \rho_1} \cdot \sigma_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

(3)式で相当応力 $\bar{\sigma}$, 相当歪み $\bar{\epsilon}$ を定義し⁵⁾, 加工硬化式として一般的に用いられる $\bar{\sigma} = k\bar{\epsilon}^n$ を仮定して n 値を求めた。(3)式の r_1, r_2 はそれぞれ主応力方向の塑

性異方性係数である。r 値は単純引張試験における板厚歪み (ln t/t₀) と幅歪み (ln w/w₀) を 5 点で測定し、 $r = \ln(w/w_0) / \ln(t/t_0)$ より 5 点の平均値として求めた。

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \sqrt{3/2} \cdot \left[\frac{r_1 r_2}{r_1 r_2 + r_1 + r_2} \right]^{1/2} \\ &\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \frac{1}{r_2} \cdot \sigma_2^2 + \frac{1}{r_1} \cdot \sigma_1^2 \right]^{1/2} \\ \bar{\epsilon} &= \sqrt{2/3} \cdot \left[\frac{r_1 r_2 + r_1 + r_2}{r_1 r_2} \right]^{1/2} \\ &\left[\frac{r_1 \epsilon_1^2 + r_2 \epsilon_2^2 + r_1 r_2 (\epsilon_1 + \epsilon_2)^2}{1 + r_1 + r_2} \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

4.5 ミクロ組織

変形機構を調査するため、加工後のミクロ組織を光学顕微鏡により観察した。

5. 実験結果および考察

5.1 引張特性, 張出性

Fig. 3 は単純引張変形における全伸び, 一様伸び, n 値と結晶粒径の関係を示した。L 方向 (圧延方向) の n 値は粒径が増大するとともに大きくなる。このため一様伸びが増加し, その結果全伸びも粒径とともに増大する。一方, T 方向 (圧延直角方向) の n 値および一様伸びは L 方向に比べ極めて小さく, ほとんど局部伸びで変形する。また L 方向のような粒径の影響はほとんど認め

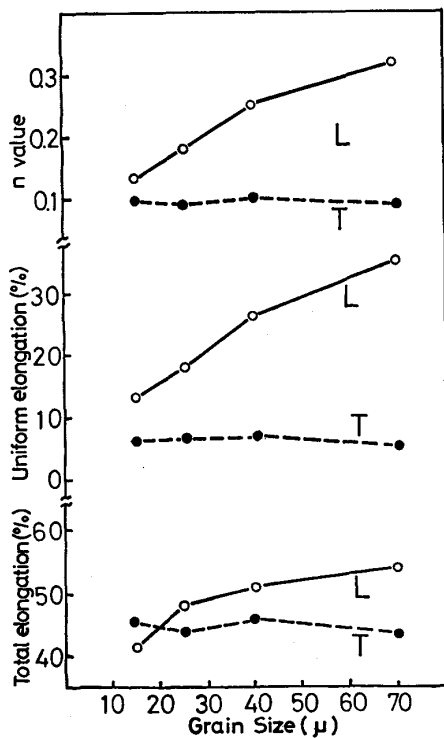


Fig. 3. Relation between tensile properties and grain size.

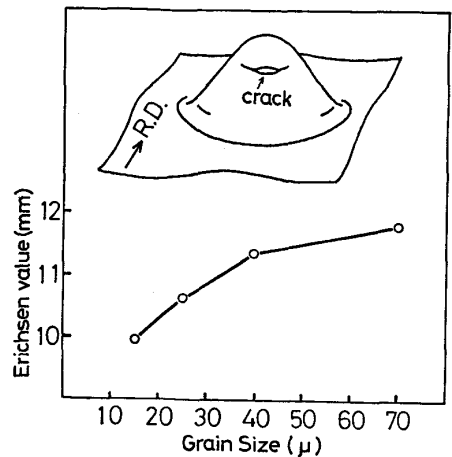


Fig. 4. Relation between Erichsen value and grain size.

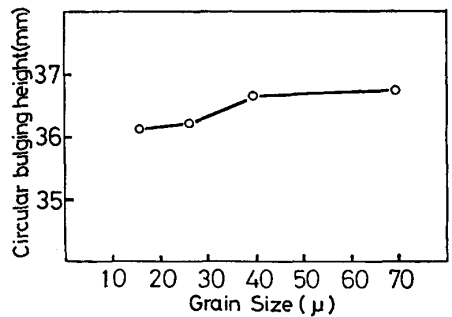


Fig. 5. Relation between circular bulging height and grain size.

られず, 全伸びは結晶粒径に対してほぼ一定の値を示す。

Fig. 4 は結晶粒径とエリクセン値の関係を示し, Fig. 5 および Fig. 6 はそれぞれ結晶粒径と真円バルジ高さ, 楕円バルジ高さの関係を示した。

エリクセン値は結晶粒径が大きくなるとともに増大する。また, 真円バルジ高さも, 粒径の影響はエリクセン値に対するほど大きくはないが, これと同様の傾向を示す。このように純チタン板の張出し性は結晶粒径の増大により向上する。また純チタン板の張出成形での割れは, Fig. 4 に示すように, 圧延方向に直角に生じ, これは張出性が L 方向の性質に支配されていることを示している。この点は Fig. 6 の楕円バルジ成形でより明瞭に示される。この場合, 最大主歪みを圧延方向およびこれと直角の方向で発生させるため, 楕円バルジの短軸が圧延方向および圧延方向と直角を成す方向に設定し, 試験を行つた。Fig. 6 から明らかなように, T 方向の成形高さは L 方向に比べ大きく, また, 結晶粒径の影響はほとんど受けない。一方, L 方向では粒径が大きくなるとともに成形高さが増大する。このように, 純チタン板の張出成形での延性は L 方向よりも T 方向の方が良好な

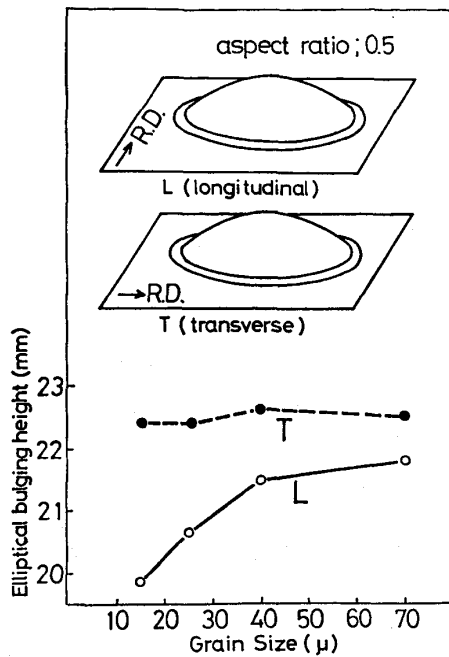


Fig. 6. Relation between elliptical bulging height and grain size.

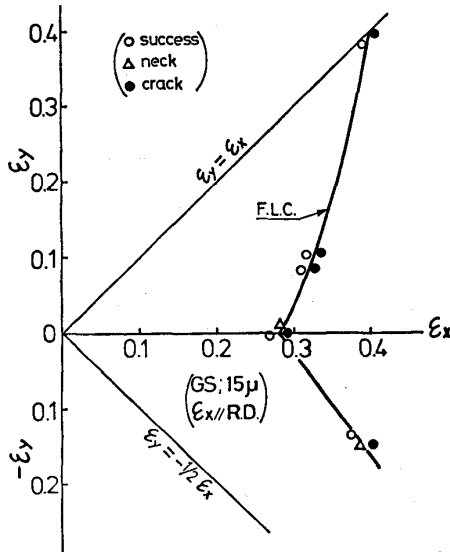


Fig. 7. Forming limit curve (F.L.C.) determined for the material of 15 μm grain size in the longitudinal direction.

め、エリクセン試験のような張出成形では破断はL方向に直角に発生する。また、このL方向の延性は結晶粒径が増大するとともに向上するので、エリクセン値も大きくなることが理解される。

5.2 変形限界線

エリクセンおよびバルジ試験で得られた純チタン薄板の張出し成形域での変形特性をより一般化してとらえるため、結晶粒径が 15 μm と 70 μm の材料について変形限界線を求めた。

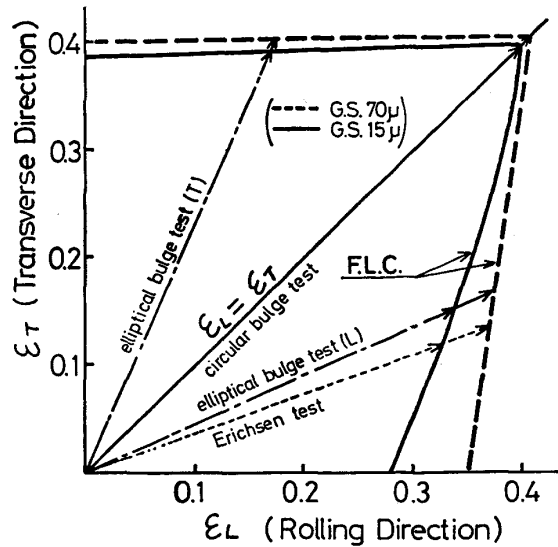


Fig. 8. Influence of grain size and direction of maximum principal strain on forming limit curves (F.L.C.) in stretch formig region.

Fig. 7 に変形限界歪みを測定し、変形限界線 (F.L.C.) を描いた一例を示す。これは結晶粒径が 15 μm の材料で、最大主歪みをL方向に取った場合である。このようにして測定した張出し成形域における変形限界線を一括して Fig. 8 に示す。Fig. 8 では $\epsilon_L = \epsilon_T$ の線より下の領域に最大主歪みをL方向に取った変形限界線 (L方向変形限界線) を示し、 $\epsilon_L = \epsilon_T$ の線より上の領域にはT方向に最大主歪みを取ったT方向変形限界線を示している。

Fig. 8 から明らかなように、張出成形域における変形限界はT方向に比べL方向が狭く、これは平面歪み領域に近いほど著しくなる。またT方向の変形限界は結晶粒径の影響を比較的受けないのに対し、L方向ではこれが粒径の増大とともに広がる。粒径増大によるL方向変形限界の拡大は、変形様式が等2軸張出し変形から平面歪み変形へ移行するほど大きくなることも特徴として上げられる。

Fig. 8 の変形限界線はエリクセン試験および液圧バルジ試験で見られた張出し変形での面内異方性や結晶粒径への依存性を良く説明している。すなわち、純チタン薄板の張出性はL方向の変形限界により決定され、かつ、このL方向変形限界は結晶粒径の増大により広がる。このためエリクセン値および真円バルジ高さは粒径の増大とともに向上する。真円バルジ成形での破断部はほぼ等2軸張出し変形であるのに対し、エリクセン試験でのそれは平面歪み変形の側に近くなっている。したがって、真円バルジ高さよりもエリクセン値に対しての方が結晶粒径の影響は大きい。また楕円バルジ成形では、

T方向の成形高さは粒径の影響をほとんど受けず常にL方向よりも大きな値を示し、L方向では粒径に対してエリクセン値と同様の傾向を示すことも Fig. 8 の変形限界線から理解される。

このように純チタン薄板は、張出成形においてもその変形特性は大きな面内異方性を示し、T方向の方が延性が優れているので実際の張出し成形では最大主歪みがT方向となるように板取りすることが望ましい。

5.3 張出変形での加工硬化特性

一般に薄板材料の張出し性を評価する場合、単純引張変形における n 値および一様伸びが用いられ、これらの値が大きいほど張出し性は良好となる。本試験の純チタンの場合もL方向の特性で見るとこれは保たれる。すなわち、L方向では単純引張変形の n 値および一様伸びは結晶粒径とともに増大し、張出性もこれと相関して改善される。したがって、L方向の引張特性は純チタン板の張出性を評価する有効な材料特性である。一方T方向では、単純引張変形の n 値および一様伸びはL方向に比べ極めて小さく、結晶粒径にも影響されない。ところが張出変形ではT方向の方がL方向に比べ変形限界は広く、楕円バルジ成形においてもT方向の方が大きな成形高さを示す。したがって純チタン薄板の場合、単純引張変形での n 値および一様伸びの面内異方から張出成形での面内異方性を説明することはできない。むしろ単純引張りとは逆に、変形特性の面内異方性は相反する結果を示すと言える。

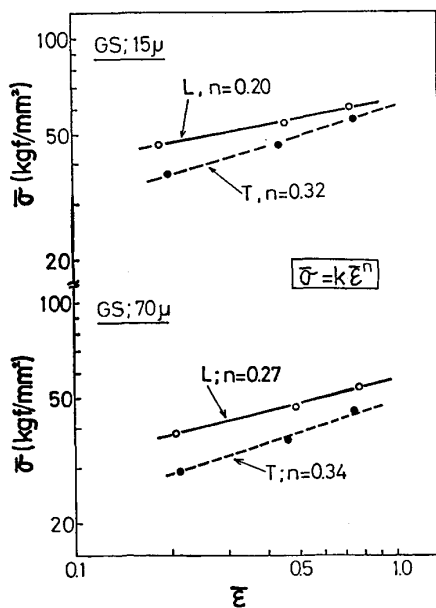


Fig. 9. Relation between effective stress, $\bar{\sigma}$, and effective strain, $\bar{\epsilon}$, obtained in elliptical bulging in both longitudinal (L) and transverse direction (T).

張出成形での面内異方性の特徴をさらに明確にするため、張出変形における加工硬化挙動を調べた。Fig. 9は結晶粒径が $15 \mu\text{m}$ と $70 \mu\text{m}$ の材料の楕円バルジ成形で得られた n 値を示す。Fig. 9 では成形高さを3段階に取り、それぞれに対応する相当応力 $\bar{\sigma}$ 、相当歪み $\bar{\epsilon}$ を求めたが、計算に用いた r 値は、 $15 \mu\text{m}$ の材料は $r_1=2.16$ 、 $r_2=5.51$ で、 $70 \mu\text{m}$ の材料は $r_1=2.64$ 、 $r_2=10.33$ である。この $\bar{\sigma}$ と $\bar{\epsilon}$ を両対数グラフ上にプロットし、直線関係を得た。 n 値はこの直線の傾きで与えられる。これから明らかのように、純チタン薄板の張出成形では、単純引張りとは逆に、T方向の n 値がL方向のそれよりも大きい。このためT方向の方が張出し領域での変形限界は広く、張出性は優れると言える。また n 値に対する結晶粒径の影響を見ると、T方向では粒径の増大により n 値は若干大きくなる程度であるが、L方向ではこの n 値増大が著しい。したがって、変形限界はT方向では粒径の影響は小さく、L方向では粒径の増大とともに広くなる。

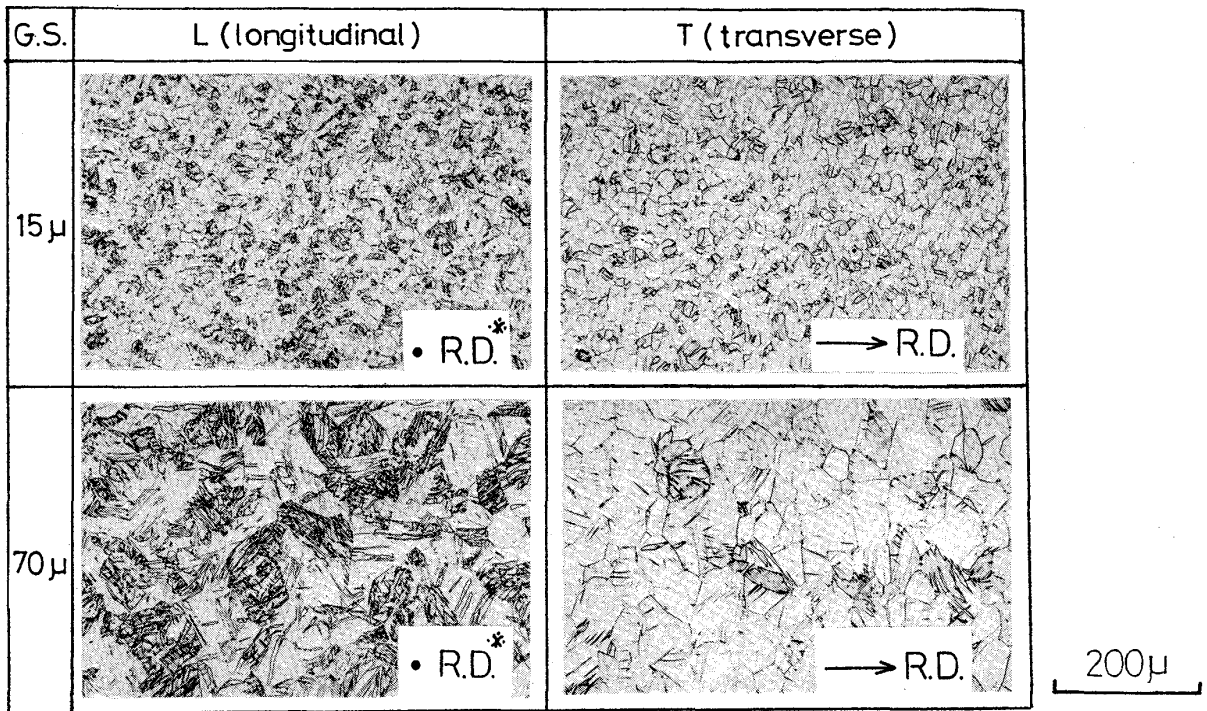
単純引張りでは n 値、一様伸びの小さいT方向が張出し成形では逆に大きな延性を示すが、これは単純引張りとは張出変形での加工硬化特性の面内異方性が逆転するため生ずる。

5.4 r 値および成形方法の張出し性に対する影響

これまで述べてきたように、純チタン薄板の張出成形における変形挙動は n 値の効果で説明できるが、ここでは r 値の影響と、液圧バルジとエリクセン試験における張出変形特性の違いについて若干の考察を行った。

張出性を支配する因子は、(1)変形限界、(2)歪みの一様性、(3)フランジからの材料の流入、の三つに分けられる。一般に n 値はこれらの因子のすべてにプラスに働き、張出性を高める。

バルジ変形の場合、ビードによる拘束でフランジからの材料の流入は抑制され、また摩擦が無い(2)と(3)の影響はほとんど問題とならず、張出性は変形限界で決まると考えられる。張出成形域での変形限界に対する r 値の影響について見ると、 r 値増大は板厚方向の変形が抑制されることから変形限界は低下すると推定される。久保寺ら⁶⁾は不安定歪みの計算から r 値増大による張出成形域での変形限界の低下を予想し、MELANDER⁷⁾は Flow Theory を基にした計算でこれを示した。しかし本試験での変形限界の変化は、 r 値の影響から期待されるそれとは逆であり、Fig. 8 に示したように、 r 値の大きいT方向の方が変形限界は広く、また r 値の増大を伴う結晶粒径の増大により変形限界は広がる。したがって、バルジ変形挙動に対する r 値の影響は無視できると



* normal to the plane of the paper

Photo. 1. Microstructures after deformation of 30% elongation in uniaxial tension in both longitudinal and transverse direction.

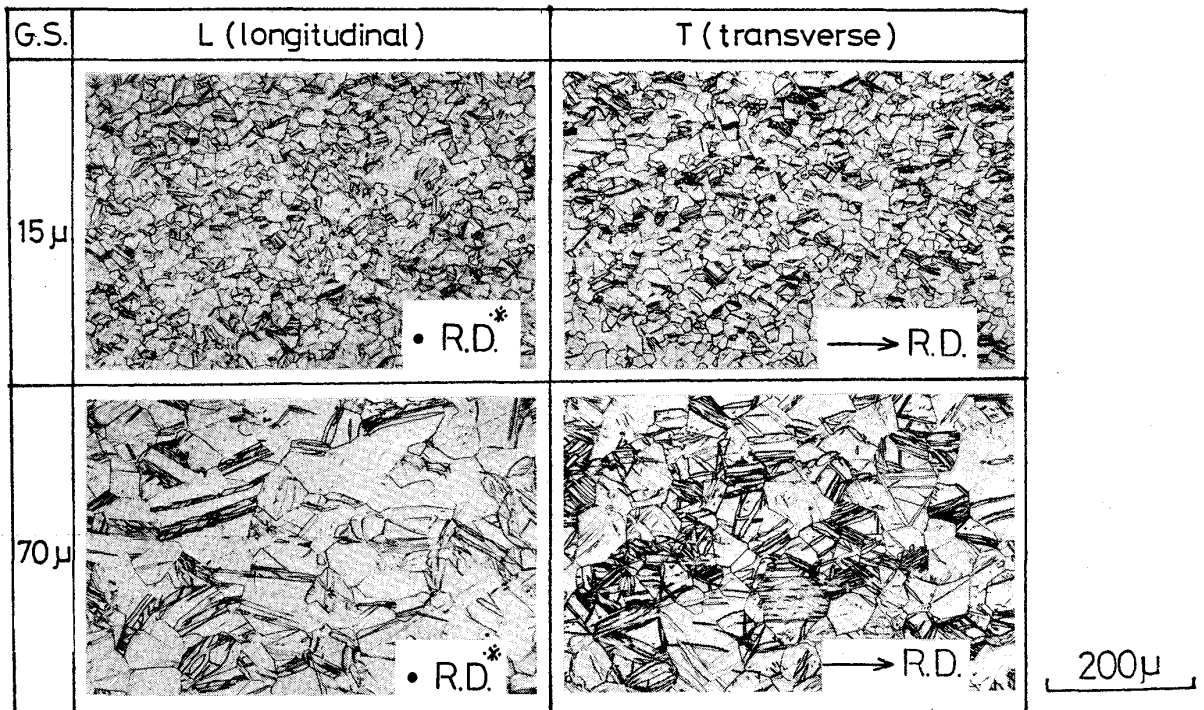


Photo. 2. Microstructures after deformation of effective strain of about 0.2 in elliptical bulging in both longitudinal and transverse direction.

言える。

一方、エリクセン試験では(2)、(3)の影響を考慮す

る必要がある。r 値が高い方がフランジからの材料の流入が増加し、エリクセン値は向上する¹⁾。歪みの一様性

に対する r 値の効果は複雑であるが⁹⁾、エリクセン試験のようにくびれが鉢巻状に入る場合は、 r 値が低い方が歪みの一様性が得られ張出し性は向上すると考えられる。このようにエリクセン値に対しては、フランジからの材料の流入と歪みの均一化を通して r 値は複雑に影響すると考えられる。また、 n 値も (2)、(3) の因子を通して影響する点で、バルジ変形とは異なる。しかし、Fig. 6 の楕円バルジ成形で見られるように、(2)、(3) の影響を無視できる場合でも、張出変形特性はエリクセン試験でのそれに一致する。したがって、エリクセン試験において (2)、(3) の影響は比較的小さく、エリクセン値もバルジ変形の場合と同様に、基本的には変形限界によつて決定されると理解できる。

以上のように、純チタン薄板の張出性は、バルジ変形、エリクセン試験いずれの場合も、変形限界の影響を最も強く受ける。また、この変形限界の変化は r 値から説明することはできず、これまで述べてきたように、 n 値が支配的であると考えるのが妥当である。

5.5 変形機構

単純引張りおよび張出し性の試験結果から明らかなように、純チタン薄板は変形様式により加工硬化挙動が異なるが、ここではこの点について変形機構の面から検討した。

Photo. 1 および Photo. 2 には結晶粒径が $15 \mu\text{m}$ と $70 \mu\text{m}$ の材料について、単純引張変形および楕円バルジ変形を与えた後のマイクロ組織を示した。歪み量は単純引張変形の場合全伸びで 30%、楕円バルジ変形の場合は相当歪みでほぼ 0.2 である。Fig. 10 は楕円バルジ変形における相当歪み量と、点算法により測定した変形双晶の密度の関係を示した。単純引張変形の場合、L 方向では変形双晶の発生が認められ、粒径が増大するとその発生密度は高まっているのに対し、T 方向ではいずれの粒径においてもほとんど変形双晶は認められない。一方楕円バルジ変形では、いずれの方向においても双晶の発生が認められ、その発生密度は Fig. 10 に示すように、単純引張りの場合とは逆で、L 方向よりも T 方向の方が高い。またこの場合、双晶発生密度に対する結晶粒径の影響を見ると、L 方向では粒径が大きい方が双晶の発生密度は高い。T 方向では、歪みが小さいところでは L 方向と同様の傾向を示すが、歪みが大きくなるとともに粒径の大小にかかわらずほぼ等しい量の双晶が発生するようになる。

純チタンの塑性変形において、双晶変形は重要な変形機構であり加工硬化との関連で見た場合、笹野ら⁹⁾も指摘しているように、その役割は次のように考えられる。

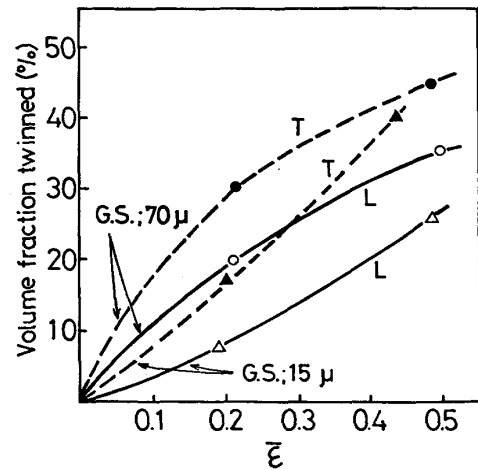


Fig. 10. Relation between effective strain, $\bar{\epsilon}$, and twin density produced in elliptical bulging in both longitudinal (L) and transverse direction (T).

すなわち、変形双晶の境界がすべり変形に対する障害となつて加工硬化性が增大するため、塑性変形での変形双晶の密度が高いほど加工硬化率は大きくなる。したがって、単純引張変形の T 方向の n 値が L 方向に比べ極めて小さいのは、加工硬化性を増大させる双晶変形の寄与がほとんど無いためと言える。一方、楕円バルジ成形では T 方向の方が L 方向よりも双晶の発生密度が高いため n 値が大きくなる。また L 方向の単純引張りおよび楕円バルジ成形では、結晶粒径の増大とともに n 値が大きくなるが、この点についても L 方向の粒径の増大による双晶密度の増加から説明される。

以上述べたように、純チタン薄板の塑性変形においては、変形様式、最大主歪み方向および結晶粒径により双晶変形挙動が変化し、これに伴つて加工硬化性が変化する。このため単純引張りと張出変形では、先に述べたような一見矛盾した変形挙動を示す。したがって、純チタン薄板のプレス成形ではそれぞれの変形様式における変形特性を正確に把握することが極めて重要である。

6. 結 言

プレート熱交換素材として供給される純チタン薄板の張出性、特にその変形特性における面内異方性について引張特性と比較して調査し、以下の結果を得た。

(1) 単純引張変形では、L 方向の加工硬化性は T 方向に比べ極めて大きい。しかし張出変形では、逆に、最大主歪みを L 方向よりも T 方向に向けた場合の方が加工硬化性が大きいため、変形限界は広く張出性は良好である。

(2) 張出成形での延性は、T 方向では結晶粒径の影響をほとんど受けないが、L 方向では粒径の増大とも

に加工硬化性が向上するため良好となる。

(3) したがって、エリクセン試験のような張出成形では、張出性はL方向の延性に支配され、粒径の増大とともに向上する。

(4) 加工硬化特性と双晶変形は密接に関連しており、塑性変形中の双晶の発生が多いほど加工硬化性は高い。この双晶発生量は、単純引張変形ではL方向が大きく、張出し変形ではT方向が大きい。またどちらの変形の場合も、L方向では結晶粒径の増大により双晶密度が増加する。

文 献

- 1) 長谷川淳, 西村 孝, 森口康夫, 谷口三男: チタニウム・ジルコニウム, 32(1984), p. 11
- 2) 中島浩衛, 菊間敏夫, 蓮香 要: 第 19 回塑性加工連合講演会論文集 (1968), p. 277
- 3) 吉田清太, 吉井康一, 小森田浩, 臼田松男: 塑性と加工, 11 (1970), p. 513
- 4) H. J. KLEEMOLA, J. O. KUMPULAINEN: Sheet Metal Ind., 55 (1978), p. 703
- 5) 福田 実: 塑性と加工, 5 (1964), p. 3
- 6) 久保寺治朗, 中岡一秀, 上野 康: 塑性と加工, 11 (1970), p. 134
- 7) A. MELANDER: Material Sci. and Eng., 58 (1983)
- 8) 林 豊: 金属材料, 7 (1967), p. 67
- 9) 笹野久興, 木村啓造: 日本金属学会誌, 41 (1977), p. 933