論文

従動クロス圧延法による純アルミニウムの変形特性

兼子 毅*¹ 宇都宮 裕* 左海 哲夫*齋藤 好弘** 古城 紀雄*²Deformation Characteristics of Pure Aluminum Sheets by
New Cross-Rolling Method Using Idle RollShinobu KANEKO*¹, Hiroshi UTSUNOMIYA*, Tetsuo SAKAI*,Yoshihiro SAITO** and Norio FURUSHIRO*²

(Received on December 26, 2005)

A new spreading method for thin strips by cross-rolling was proposed. The method employs a flat platen and an idle tapered roll moving over the material width. The continuous widening of strip width can be virtually realized by the repetition of material feeding in the longitudinal direction and reducing the thickness between the roll and the platen. In this study, 1-mm-thick or 2-mm-thick and 50 mm wide commercial aluminum strips were subjected to the model experiment using a $\phi 100$ mm two-high experimental rolling mill with a tapered roll and a flat steel platen. Consequently, the lateral spread increases with reduction whereas the longitudinal elongation is negligible. However, the applicable reduction in thickness is limited by the occurrence of edge waves. The reductions are less than 10% for 1-mm-thick strip and 24% for 2-mm-thick strip. In the textures of the as-rolled sheet, the crystal orientations vary in the longitudinal direction. The texture is not similar to that generated by transverse-rolling.

Key words : spread-rolling, cross-rolling, transverse-rolling, lateral spread, aluminum, anisotropy, texture control

1. 緒 言

材料の板幅の変更や、面内異方性を低減するために、長尺材料の拡幅が期待されることがある。しかしながら、薄板圧延ではほとんど幅広がりが生じないため、一度波板状に成形して次に平坦化するという特殊なプロセスが提案されている¹⁾⁷⁾。一方、棒線または条材では、圧延機のロール軸方向と材料の長手方向が一致するように配置して、長手方向の一部分ずつロールバイトに送り込み間欠的に往復横圧延するクロス圧延法が実用化されている⁸⁾⁹⁾。著者らも、従動ロールと平金敷を工具として用いる新たなクロス圧延法（以下、本方法を従動クロス圧延法と称する）を提案した¹⁰⁾。その方法は、生産性、適用可能な材料幅の自由度、材料のガイド性に利点があると考えられる。

このプロセスを有効に利用するためには、達成可能な拡幅量や最適な圧延条件を解明する必要がある。ロールバイトの上下流の材料からの拘束を大きく受けるので部分圧延になることや、圧下率の分布が不均一になることなどによ

り、その圧延特性は通常の圧延特性とは大きく異なると考えられる。しかしながら、こうしたクロス圧延の圧延特性はこれまでにほとんど報告例がない。

そこで、本研究では通常の小型圧延機と短尺の材料を用いて、従動クロス圧延を模擬し、圧延特性に及ぼす圧延条件の影響を調査することとした。また、クロス圧延法は面内異方性を低減する方法としても期待されている。上述の点でクロス圧延材は短尺の材料を板幅方向に圧延した横圧延材とは異なる集合組織を有するはずであるが、その差違は明らかになっていない。本研究ではクロス圧延材の集合組織測定を行い、異なる圧延方法による圧延集合組織の形成についても併せて調査した。

2. 従動クロス圧延法の原理

Fig.1 に、著者らが提案した従動クロス圧延の模式図⁷⁾を示す。この圧延機は、平坦な定盤とその上に材料の幅方向に移動する従動圧延ロールから構成される。圧延ロールはロール軸受けと共にリニアベアリング上に支持されており、クランクシャフトなどによって往復移動する。一定の長さの材料が上流から供給されるとロールが材料の幅方向に移動する。その時に、材料が部分的に圧延されることで幅方向に材料流れが生じる。そして、再び材料が送られるとロールは進行方向を変えて元の位置に向かって移動する

* 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻
〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

** 大阪大学名誉教授・(株)斎藤研究室
〒565-0824 大阪府吹田市山田西 4-1-12-613

1 現：独立行政法人海上技術安全研究所構造・材料部門材料研究グループ
〒181-0004 東京都三鷹市新川 6-38-1

2 大阪大学留学生センター 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-1

Fig.1 Schematic illustration of new spread rolling mill

ことで、再び圧延し板幅を広げる。このような一連の材料の送りとロールの移動を繰り返すことで、間欠的ではあるが、連続的に材料の板幅を広げることが可能である。ここで、ロールはロール軸が水平方向に対してわずかな角度だけ傾斜するか、もしくはロールプロフィールをテーパ状にして、下流に向かって定盤とのロールギャップが狭くなる。

3. 実験条件

供試材は工業用純アルミニウム A1100-O で、その寸法は板厚 1mm または 2mm で幅 50mm、長さ 135mm の短冊状である。通常のロール直径 100mm の実験用小型二段圧延機を用い、上記の圧延方法を模擬する。Fig.2 に示すように、平金敷の代用として定盤を用い、上下ロールにそれぞれ、テーパロールと平ロールを用いる。定盤上には被加工材が固定されており、定盤が下ロールとの摩擦によってロールギャップ内部に送られることで、被加工材は定盤ごと圧延される。ここで、上ロールは常に従動にしてある。なお、下ロールの周速は $6.1\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ とした。定盤上では、トンネル状のガイドでロールギャップの上流および下流側から材料は支持される。本論文では往路・復路ともに圧延を行うリバース圧延方式とした。すなわち始めに、往路で材料を圧延する(Fig.3(a))。次に一定の送り量 f だけ板を長手方向(ロール軸方向)に移動させ、復路で再び圧延し(Fig.3(b))、一定の送り量 f だけ材料を送る。以上の工程を繰り返すことで板全体をクロス圧延する。このとき Fig.3(c) に示す側面図より圧延パラメーターによる圧延の幾何学から、ロールの接触長さ $l_{\max}$ と接触幅 w は以下のように表現される。

接触長さ: $l_{\max}$

$$l_{\max} = \sqrt{2Rf \cdot \tan \theta} \leq \sqrt{2R(h_0 - h_1)} \quad (1)$$

接触幅 : w $w = f + (h_0 - h_1) \cot \theta \quad (2)$

ここで、 h_0 、 h_1 は各々圧延前後の板厚、 R は圧延ロール半径、 f は送り量である。

ロールは、テーパ状のプロフィールを持ち、そのテーパ角度 θ が 0.5° 、 1° と 2° の 3 本を用意した。ロール直

Fig.2 General view of experimental rolling mill employed in this study.

Fig.3 Schematic illustration of cross-rolling procedure employed in this study

径 $2R=100\text{mm}$ であり、ロール胴長 43mm のうち、下流側の平坦部 10mm のプロフィールはロール軸と平行である。材料の送り量 f を 1, 2, 3, 4mm とし、圧下率は

$$r = (h_0 - h_1) / h_0 \quad (3)$$

と定義して、5% から 30% の範囲で圧延を行った。なお、圧延は全て室温、無潤滑の条件で行った。

圧延板の圧延途中の板の外観写真を撮影し、圧延板の平面形状及び表面性状を調べた。続いて、変形特性として幅広がり率、延伸率を評価した。ここで、幅広がり率 s は圧延前後の板幅の変化率として式(4)の定義を用いて算出した。

Fig.4 Appearances of sheets during cross-rolling. (Rolling condition : $\theta=1^\circ$, $f=1\text{mm}$, and 4mm , $h_0=1\text{mm}$)

$$s = (w_1 - w_0) / w_0 \quad (4)$$

なお, w_0 , w_1 は各々圧延前後の板幅である. また, 圧延板板厚中心層の集合組織を Cu-K α 線源を用いて Schulz の透過・反射法にて測定した. なお, 集合組織測定に使用する薄膜試料は 10%水酸化ナトリウム水溶液を用いた化学研磨により作製した.

4. 実験結果と考察

4.1 圧下率と送り量の影響

Fig.4 に, テーパー角度 $\theta=1^\circ$ のロールを用いて, 初期板厚 1mm の供試材を圧延する場合の圧延途中の試料の外観写真を示す. 圧延方向は上下方向, 材料の送りは左方向である. 短尺の試料の途中より圧延を開始している. 材料の右側が未変形部分で, 左端は非圧延部で中央が圧延された部分である. 送り量 f は, Fig.4(a)から Fig.4(c)は 1mm で, Fig.4(d)は 4mm の条件である. 下流に行くほど, すなわち板厚が減少するにつれて, ロールバイト内部では単調に幅が広がっていることが分かる. そして, ロールバイト通過後の圧延板の板幅はほぼ一定である. 圧延板の上ロール側表面には圧延方向に沿うごく浅いロールマークが残留する. また, Fig.4(a)から(c)へと圧下率が増すにつれて, 幅広がりが大きくなる. しかしながら, 圧下率が過大 (Fig.4(c)) になると縁波が発生する. 圧下率と送り量が, 幅広がり, 延伸率と急峻度に及ぼす影響を Fig.5 にまとめた. ここで, 急峻度は縁波の発生程度を表し, 縁波の高さ a と波のピッチ b との比と定義して下記の式を用いて求めた.

$$\lambda = a/b \quad (5)$$

Fig.5 中には, 送り方向への延伸率をゼロと仮定した時の理想幅広がり曲線も示したが, 幅広がりはその曲線にほぼ従っている. よって平面ひずみであると仮定して, 板幅の変化を概算することが可能である. この条件($h_0=1\text{mm}$, $\theta=1^\circ$)では縁波は圧下率が 10%以上になると生じはじめ,

Fig.5 Effect of total reduction (r_t) and feeding amount (f) on lateral spread, longitudinal elongation and steepness during cross-rolling. ($\theta=1^\circ$, $h_0=1\text{mm}$)

それ以上の圧下率では急峻度が増大し, 圧延板の平坦度は悪化する. Fig.4(a)と Fig.4(d)との比較, および Fig.5 から, 平面形状に及ぼす送り量 f の影響は小さいことが分かる. ただし, 送り量が大きい場合(4mm)には, 縁波が発生し始める限界圧下率は送り量が小さい場合(1mm)に比べてやや低く, 急峻度はやや大きい.

4.2 素材板厚の影響

素材板厚が厚い(2mm)場合の圧延途中の外観写真を Fig.6 に示す. 素材板厚 1mm の時(Fig.4)と同程度の幅広がりが生じているが, 縁波の発生は少ない. Fig.7 に各々のロー

Fig.6 Appearances of sheets during cross-rolling. (Rolling condition : $\theta=1^\circ$, $f=4\text{mm}$, $h_0=2\text{mm}$)

Fig.7 Effect of total reduction (r_t) and feeding amount (f) on lateral spread, longitudinal elongation and steepness during cross-rolling. ($h_0=2\text{mm}$)

ルーナー角度について幅広がり率、延伸率と急峻度への圧下率の影響を示す。Fig.7(b)がFig.5に対応するルーナー角度 1° の場合の結果である。板厚は幅広がり率にはあまり影響せず、理想幅広がり曲線に従っている。しかし、縁波が発生しはじめる圧下率は、板厚が厚い場合には25%とかなり高くなっていることが分かる。このことは、板厚が厚いほど座屈が生じ難く、高圧下率まで平坦な形状を維持できることを意味している。こうした縁波の発生は先のプラスチックを用いたモデル実験でも観察されている¹⁰⁾。その原因は定性的に以下のように説明できる。まず、ロールバイト内において、板幅端部では幅広がりが大きいため、移動経路が長くなるので、エッジストレッチが発生する。その延伸ひずみは板幅中央部の延伸ひずみよりも大きい。その後、ロールバイト出口で長手方向の延伸ひずみが板幅方向に対して一樣になる要請が生じるため、板幅端部は圧縮応力が残留する。エッジストレッチが過剰の場合には収斂できず、板幅端部が座屈し縁波が生じる。

4.3 テーパー角度の影響

Fig.8 は圧下率が19%の条件で、異なるルーナー角度のロールを用いた場合の圧延板の外観写真を比較したものである。ルーナー角度が大きくなると、式(2)で計算される接触幅は短くなるが、どのルーナー角度でも、最終的にはほぼ同等の幅広がりが見られることが分かる。Fig.7(a)から(c)は、各々のルーナー角度について変形特性に圧下率が及ぼす影響を示したものである。図中の平面ひずみの理想曲線に沿って幅広がり大きくなる。他方、ルーナー角度が大きいくほど圧延板の長手方向の延伸は若干大きくなる傾向がある。いずれのルーナー角度においても縁波は圧下率が25%を超えると発生するが、その急峻度はルーナー角度が大きいくほど若干大きい。変形特性に及ぼす送り量の影響はあまり顕著ではないが、送り量が大きいく方が若干幅広がり大きくなり、その影響はルーナー角度が大きいくほどやや大きい。ルーナー角度が大きいく、かつ送り量の小さい条件では、延伸が大きく幅広がり小さい。

Fig.8 Appearances of sheets during cross-rolling. (Rolling condition : $\theta=0.5^\circ$ and 2° , $f=1\text{mm}$ and 4mm , $h_0=2\text{mm}$)

Fig.9 $\{111\}$ pole figures of the as-received, as-transverse-rolled and as-cross-rolled sheets. (Rolling condition : $r=30\%$, $f=1\text{mm}$)

4.4 圧延板の集合組織

Fig.9 に圧下率 30%の圧延材の板厚中心層の $\{111\}$ 極点図を示す。比較のため、幅方向に同じ圧下率の通常圧延を行った材料、すなわち横方向圧延材を併せて示す。なお、図中の Initial RD および TD とは、圧延前の供試材の圧延方向と板幅方向を示す。供試材は冷延焼鈍板であるので、 $\{100\}<001>$ 方位と $\{123\}<634>$ 方位からなる典型的な Cube type と R type の集合組織を示す。横方向圧延材の集合組織は $\{110\}<112>$ 方位、いわゆる Brass type 近傍に強い集積を示し、RD 軸及び TD 軸に対称な集合組織になっている。

これは、これまでに報告されてきた横方向圧延による圧延集合組織と一致する^{11,12)}。一方、従動クロス圧延材の集合組織は、供試材と同じ方位成分を持つが、テーパ角度が小さい($\theta=0.5^\circ$)場合ほど、長手方向、つまり初期の RD 軸周りの分散が大きい。そして、テーパ角度の大きい条件($\theta=2^\circ$)では TD 軸及び RD 軸に対して非対称の分布になっている。以上の結果から、従動クロス圧延材の集合組織は、横方向圧延材のそれとは異なり、RD 軸周りの方位分散を持つ集合組織を有し、その集合組織はテーパ角度が小さいほど対称となることが分かった。

5. 結 言

工業用純アルミニウム板を用いて従動ロール拡幅圧延法の圧延特性を調査し、以下の知見を得た。

1. 従動クロス圧延材の板幅は、延伸がない平面ひずみ変形と仮定して予測することができる。
2. 従動クロス圧延では限界圧下率を超えると縁波を生じて平坦度不良になる。この限界圧下率は初期板厚が厚いほど大きくなる。
3. 従動クロス圧延材の集合組織は供試材の集合組織を長手方向周りに回転させた方位成分を持ち、またテーパ角度が大きいほど、幅方向に対して非対称な集合組織を示す。

参 考 文 献

- 1) 高町恭行・山田健二・小川茂・阿高松男：第 41 回塑加連講論，(1990)，117-120.
- 2) 高町恭行・山田健二・小川茂・阿高松男：第 43 回塑加連講論，(1992)，703-706.
- 3) 高町恭行・山田健二・小川茂：特開平 5-69004，(1993).
- 4) 上堀雄司：特開昭 58-184002，(1983).
- 5) 松本 良・水田篤男・小坂田宏造：平成 16 塑加春講論，(2004)，271-272.
- 6) 宇都宮裕・齋藤好弘・左海哲夫・松枝茂幹・関野貴夫：軽金属，48-11 (1998)，581-584.
- 7) Y. Saito, H. Utsunomiya, S. Kaneko, T. Sakai, T. Kanzaki : Advanced Technology of Plasticity, 2, (1999), 922-927, Springer Verlag.
- 8) 菅 洋三・岡 武：塑性と加工，45-527 (2004)，1022-1026.
- 9) 吉田圭一郎：鉄と鋼，71-10 (1986)，1637-1640.
- 10) Y. Saito, H. Utsunomiya, S. Kaneko, T. Sakai, N. Furushiro : ISIJ international, 49-9 (2002)，1000-1004.
- 11) W. Y. Yeung, B. J. Duggan : Acta metall., 34 (1986)，653-660.
- 12) M. Y. Huh, S. Y. Cho, O. Engler : Mat. Sci. Eng. A, 315 (2001)，35-46.