

3ピース缶用鋼板のフルーティング性に及ぼす 製缶条件の影響

荒谷 昌利*・登坂 章男*・古君 修*・小原 隆史*・久々湊 英雄*²

The Effect of Deformation Conditions on the Occurrence of Fluting at 3-pieces Can Body Making
Masatoshi ARATANI, Akio TOSAKA, Osamu FURUKIMI, Takashi OBARA and Hideo KUGUMINATO

Synopsis : The continuously annealed tinplate with low carbon chemistry often exhibits the “fluting” trouble which is associated with stretcher strain defect, when it is roll-formed for making a 3-pieces can body. For preventing the occurrence of fluting, the influence of the forming conditions is focused in this study, leading to following results. The “flexor treatment” just prior to roll forming, recognized as effective for solving the problem, is attributable to the reduction of both the yield point elongation and yield strength in the tinplate. Furthermore, the tendency of the fluting occurrence can be drastically decreased by employing high speed or low temperature roll-forming condition. A greater number of stretcher strain pattern on the deformed sheet is introduced by the high speed or low temperature deformation. This, in turn, suppresses clear recognition of the stretcher strain pattern preferably.

Key words : roll-forming ; fluting ; stretcher strain ; Lüders band ; deformation speed ; deformation temperature ; Lüders band velocity ; yield elongation.

1. 緒言

金属缶は安全性、衛生性、内容物の保護性、機能性、リサイクル性などが社会的に高く評価され、現代社会に良く適合した飲料用容器として、1994年の年間生産量は約385億缶に至っている¹⁾。金属容器は、その構造様式により2ピース缶と3ピース缶の2種類に大別される。そのうち、3ピース缶はブリキやティンフリースチールの缶用鋼板をロール成形で円筒状に加工した後に各種接合法で製胴した胴部と、天蓋および底蓋の三つの部分で構成された容器である^{2,3)}。

3ピース缶の製胴工程において発生する特有の問題として、フルーティングが挙げられる。これは鋼板を円筒状に曲げ加工する際に、鋼板が折れ線状に屈曲する現象であり、時効性を有する鋼板で発生しやすいと言われている⁴⁾。従来、軟質缶用鋼板は箱型焼鈍で製造されてきたが、最近では生産性、材質の均一性に優れている連続焼鈍法が主流となっている⁵⁾。連続焼鈍法で製造された鋼板は均熱後の冷却速度が速いため、鋼中に固溶Cおよび固溶Nが残存しやすく、時効性が高い⁶⁻⁸⁾。さらに、缶用鋼板は一般に塗装、印刷、焼付けの熱処理工程を経た後に製缶されるために、歪み時効が進行しフルーティングが発生しやすい。これらの時効性を有する鋼板について、周藤は耐フルーティング性の向上に調質圧延が有効であることを報告しており⁹⁾、丸岡らは

焼鈍時の過時効時間の制御により低下率の調質圧延でも優れた耐フルーティング性が得られることを報告している¹⁰⁾。しかし、これらの研究は、鋼板の時効性を低減することを目的としたものであり、製缶条件の観点からフルーティングを抑制する研究は今までなされていない。さらに、今後の素材の薄肉化に対応するには、固溶C、固溶Nによる固溶強化を利用することで缶体強度を確保することが必要になると考えられ¹¹⁾、その際に製缶条件を最適化することによりフルーティングを抑制する技術の開発が強く望まれている。

本報告では、連続焼鈍法にて製造した窒素添加高強度低炭素アルミキルド鋼を用いて、耐フルーティング性に及ぼす製缶時の成形速度および成形温度の影響について研究した結果について述べる。

2. 実験方法

2・1 供試材

本研究に用いた低炭素アルミキルド鋼ぶりき板の化学組成、および板厚をTable 1に示す。連铸スラブを熱間圧延、冷間圧延、連続焼鈍後、圧下率1.5%の調質圧延を施し、板厚0.18mmのぶりき板とした。CおよびN含有量がそれぞれ0.041mass%および0.0099mass%と高く、鋼中に固溶Cおよび固溶N量が残存している。このぶりき板に対して、塗装、

平成8年9月10日受付 平成9年1月14日受理 (Received on Sep. 10, 1996; Accepted on Jan. 14, 1997)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

* 2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

焼付け相当の時効処理(210°Cにて30分の時効処理)を施した試料を、その後の各種試験に供した。Table 2 には時効処理後の降伏応力(YS)および降伏点伸び(Y-EI)を示す。

2・2 時効性鋼板の実機製缶におけるフレクサー加工の影響

3ピース缶胴の成形装置をFig. 1に模式的に示す。塗装、焼付け後、切断した素材を図中の左から右方向に搬送し、途中、フレクサー(Flexor)と呼ばれる装置を介し、その後、ある角度に設定したエッジに衝突することによって曲げ加工し円筒状に製胴する。フルーティング性は鋼板のYSおよびY-EIと関係があり、とくにY-EIが大きい材料で発生しやすいと言われている⁹⁾。フレクサーでは、高低差のある通路を板が通過することで、素材に軽度の曲げ・曲げ戻し加工が付与される。この際、バウシンガー効果により、素材のYSおよびY-EIが低下し、フルーティングの発生が抑制されていると推定される。そこで、まずフレクサー加工前後でのYSおよびY-EIの変化を調べた。試験片はスードロニック社製缶装置にてフレクサー加工まで行い、直ちにドライアイス中で保管し、時効の進行を抑制した。その後、試料を、JIS 5号試験片に加工し、インストロン型引張試験機により10mm/minのクロスヘッド速度にて室温引張試験を行った。また、フレクサー加工を施した試料と施していない試料について、Fig. 2に示す円筒成形試験装置により、フルーティング性を評価した。この際の、円筒成形速度(ロール周速)は3mpm、成形後の円筒径は45mmφとなるように調

整した。

また、円筒成形試験用としてフレクサー加工直後の試料を大量に採取するのは困難なために、フレクサー加工を実験室的に模擬することを目的とし、試料に種々の圧下率で冷間圧延を施し、実際にフレクサー加工を施した試料とYS、Y-EIの比較を行った。その結果、Table 3に示すように、圧下率1.5%の冷間圧延によりフレクサー加工を施した試料とほぼ同等のYS、Y-EIが得られることが確認できたため、以降の円筒成形試験にはフレクサー加工の模擬として、冷間圧延(圧下率1.5%)による軽度の予びずみ加工を行うことにした。

Table 3. Mechanical properties of specimen passed through the flexor and temper rolled.

| T.R / % | YS / MPa | Y-EI / % |
|------------------------------|----------|----------|
| 0 | 445 | 7.8 |
| 0.5 | 430 | 6.2 |
| 1.0 | 420 | 4.6 |
| 1.5 | 395 | 1.6 |
| As passed through the flexor | 402 | 3.5 |

Table 1. Chemical composition of steels tested.(mass%)

| C | Mn | Al | total - N | N as AlN |
|-------|------|-------|-----------|----------|
| 0.041 | 0.24 | 0.037 | 0.0099 | 0.0005 |

Table 2. Aging treatment condition and mechanical properties of steels tested.

| Aging treatment condition | YS/MPa | Y-EI/% |
|---------------------------|--------|--------|
| 210°C×30min | 433 | 7.8 |

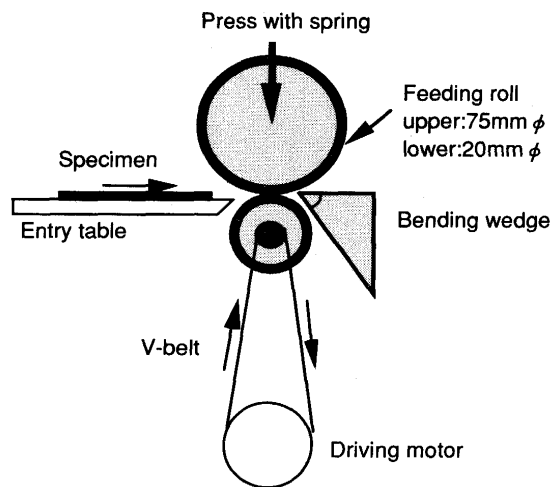


Fig. 2. Schematic illustration of the device for the simulation of 3-pieces can body making.

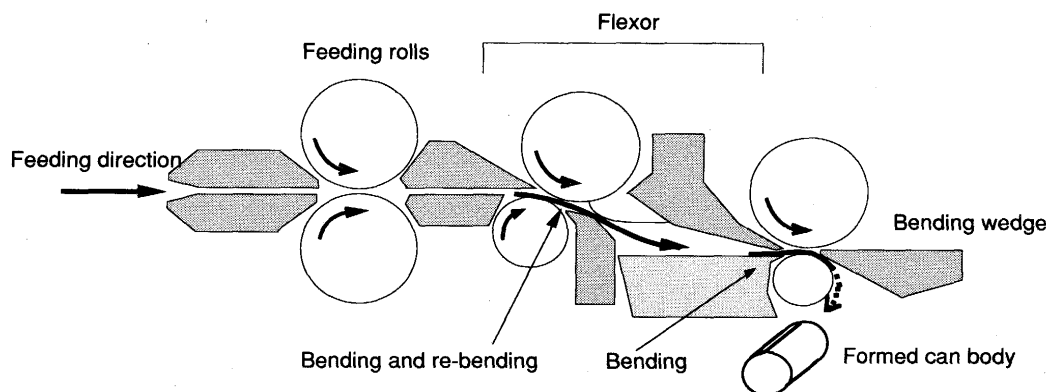


Fig. 1. Schematic illustration of the device for 3-pieces can body maker.

2・3 フルーティング発生に及ぼす成形速度の影響

Fig. 2 に示した円筒成形試験装置により、フルーティング性に及ぼす成形速度の影響を調べた。円筒成形速度はロールの回転速度により制御し、周速を5～200mpmの範囲で変化させた。その後、鋼板表面に生じる折れの状況を目視または実体顕微鏡観察により調べた。

2・4 折れ発生に及ぼす成形温度の影響

試験片を室温～200℃に加熱したホットプレート上で1分間保持した後、そのままFig. 2の装置にて温間で円筒成形試験を行い、その後、鋼板表面の観察を行った。また、成形速度については、実験結果3-2で後述するように、室温でフルーティングが発生しなかった成形速度(ロール周速)の100mpmとした。

2・5 リューダース帯の伝播速度に及ぼすひずみ速度

および温度の影響

試料をJIS 5号に加工した後、インストロン型引張試験機によりクロスヘッド速度を5～200mm/minの範囲で、また、引張試験温度を室温(23℃)～200℃の範囲で変化させ引張試験を行った。試験片を引張試験機のチャック間に固定した後、炉内の試験片観察が可能な恒温炉内で所定温度に1分間保持し、その後、所定のクロスヘッド速度の条件下で引張試験を行った。リューダース帯の伝播速度の測定を容易にするために、試験片平行部内の片端部にポンチで圧痕をつけ、必ずリューダース帯が1点から1本のみ発生するようにし、また平行部に40mm間隔で標線をけがき、リューダース帯が標線間を伝播する時間を測定することで、伝播速度を算出した。

3. 実験結果

3・1 実機製缶におけるフレクサーの効果

引張特性に及ぼすフレクサー加工の影響をFig. 3に示す。塗装、焼付けのままの状態では、YSが約440MPa、Y-EIが8%以上と高い値を示すが、フレクサー通過直後は各々400MPaおよび3%に減少している。塗装、焼付け処理により時効が進んでいる状況では、転位はC、Nによりほぼ固着されており、可動転位が極めて少ない状態である。このため降伏点現象が発生し、YS、Y-EIが大きな値を示す。しかし、フレクサーにより曲げ、曲げ戻し加工を受けることにより転位が固溶C、固溶Nの固着から解放された結果、可動転位密度が増加し、YS、Y-EIの顕著な低下がもたらされたものと考えられる。フレクサー加工後の試料を、時効させると、YS、Y-EIが回復することからも、この考え方の正当性が示唆される。また、フレクサー加工前後の試料を円筒成形試験した後の試験片の外観をFig. 4に示す。フレクサー加工後の試料にはフルーティングは発生しておらず、これは、Fig. 3の結果と対応している。

以上述べたように、フレクサー加工は鋼板のフルーティ

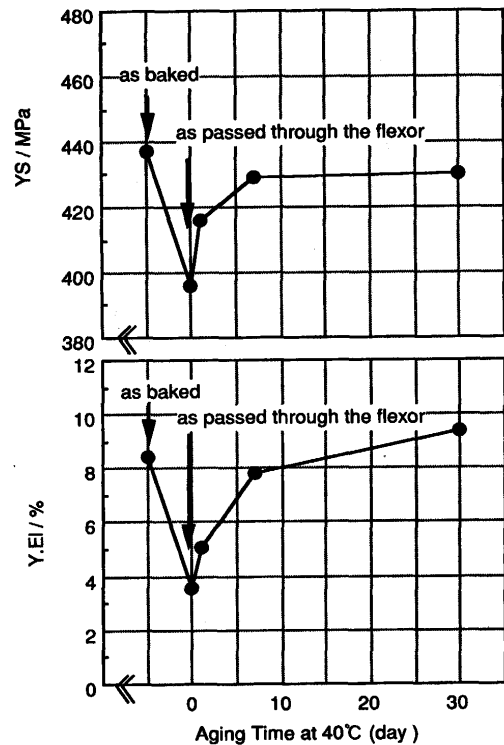


Fig. 3. Effect of aging after leveling treatment with the flexor on mechanical properties.

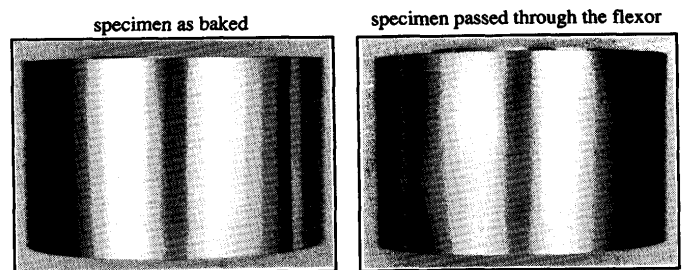


Fig. 4. Effect of flexor on the appearance of specimen after roll forming test.

ング(折れ)発生防止に有効であり、レベラー加工と類似の効果をもっていることが明らかとなった。

3・2 フルーティング発生に及ぼす成形条件の影響

フルーティングの発生に及ぼす成形速度(ロール周速)の影響をFig. 5、Fig. 6に示す。なお、以降、腰折れ現象を“フルーティング”とし、フルーティングを構成する1本単位の腰折れ部を“折れ”と、区別して表記する。低速での成形では曲げ加工により、塑性変形を起こした線状の部分(Fig. 6で黒く見える線)が数本集まって束になり、これが幅をもった鮮鋭な折れとして観察される。また、塑性変形していない(折れていない)部分との区別がはっきりしている。しかし、より高速の成形になるほど、線状の塑性変形部は束にならず板面全体にわたり均等に分布するため、折れが不鮮明になり、ついには目視では判別できなくなる。つまり、鋼板の単位長さあたりに発生する折れの本数(折れ密度)の増大に伴い、フルーティングが発生した外観不良と

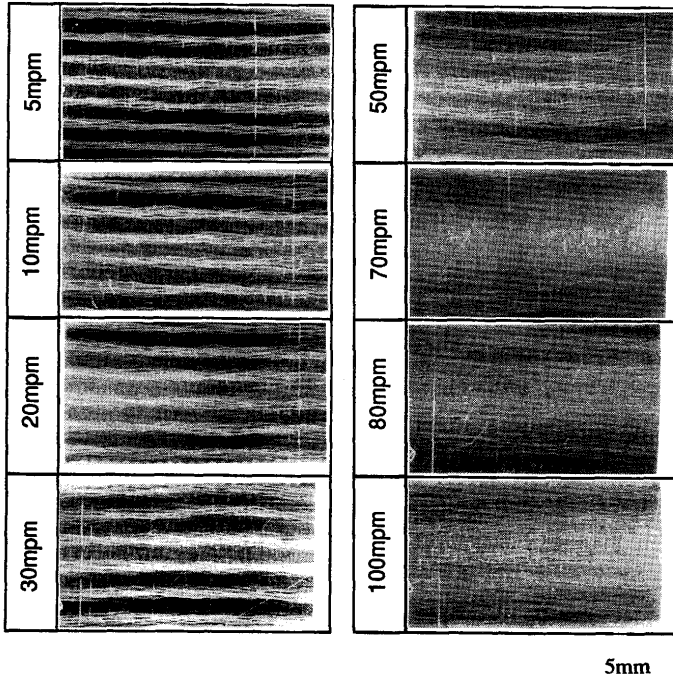


Fig. 5. Effect of deformation rate on the appearance of bend-mark on the steel as baked.

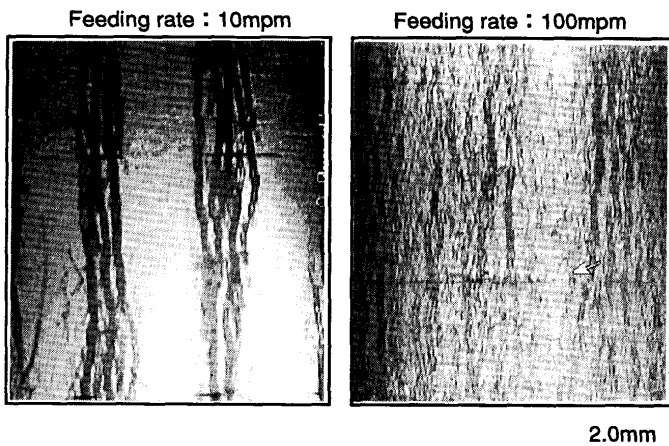


Fig. 6. Effect of deformation rate on the appearance of the bend-mark.

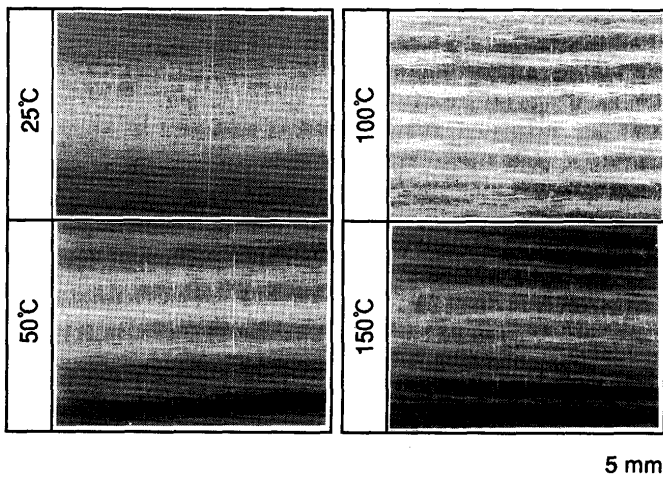


Fig. 7. Effect of deformation on the appearance of bend-mark.

して判別されなくなることがわかった。

フルーティングの発生に及ぼす成形温度の影響をFig. 7に示す。成形速度(ロール周速)は、Fig. 5に示した室温成形試験の結果より、鮮鋭な折れが発生しなかった100mpmとした。折れの形態変化に及ぼす成形温度の影響は大きく、成形温度の上昇とともに、折れ(塑性変形部分の束)の幅は狭くなり、より鮮鋭な折れになる。なお、高温加熱による時効の影響を確認するため、加熱後1分間保持し、その後、水冷した後に室温成形する実験を行ったが、いったん水冷して室温で成形試験を行うと、予加熱温度にかかわらず鮮鋭な折れは発生しなかった。

4. 考察

前節で述べたように、製缶時の折れの発生に対しては成形速度および成形温度の影響が極めて重要であり、ある臨界値以上の高速度、あるいはある臨界温度以下の低温での成形条件下では外観不良と認識されるような折れが発生しないことが明らかとなった。一方向に曲げモーメントを付与する円筒成形だけでなく、円筒絞り成形においても、Fig. 8に示すように低速度の成形では顕著なストレッチャーストレインが発生するのに対し、高速度の成形においてはこれが実質的に消滅する。

3ピース缶の製胴時に発生するフルーティング現象と、円筒絞り成形および引張試験時に発生するストレッチャーストレインは、加工変形時に材料にかかる応力の方向は異なるが、いずれもリュウダース帯の運動により支配される塑性変形模様であり、本質的に同じものである。また、その形態は加工時のひずみ速度と深い関係があると考えられる。

3・2で述べたように、見かけ上、「フルーティング」が発生した外観不良材であるかの区別は、円筒成形時に単位長さあたり発生する「折れ」の本数により決まる。そこで、

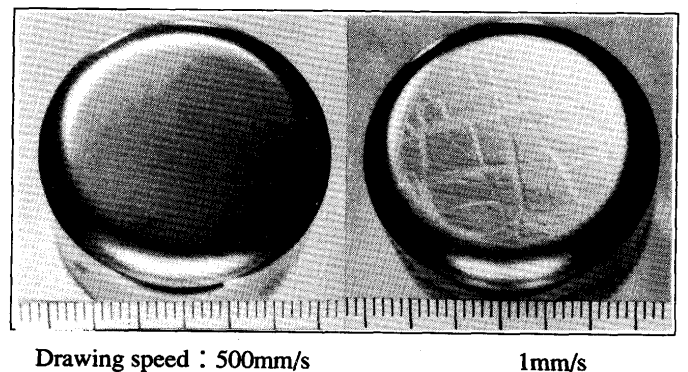


Fig. 8. Effect of strain rate on the appearance of deep drawn cup. (sheet thickness, 0.21mm ; punch diameter, 33mm ϕ ; blanking diameter, 68mm ϕ ; drawing ratio, 2.06)

フルーティングを示す指数として折れ密度(リュウダース帯の密度) n で整理した。

すなわち, n 個のリュウダース帯が伝播することにより, 時間 dt の間に生じるひずみ $d\epsilon$ は(1)式で表される。

$$d\epsilon = n \cdot \epsilon_L \cdot V_L \cdot dt \dots\dots\dots (1)$$

n ; 単位長さあたりのリュウダース帯の数

ϵ_L ; リュウダースひずみ

V_L ; リュウダース帯の伝播速度

(1)式より, リュウダース帯の密度 n は(2)式で表される。

$$n = \dot{\epsilon} / (\epsilon_L \cdot V_L) \dots\dots\dots (2)$$

ここで, (2)式で決まるリュウダース帯の密度 n が大きいほど, リュウダース帯が板面全体に分散化し, フルーティング(折れ)を防止できると考えられる。

(2)式からわかるように, n は ϵ_L と V_L によって決まる値である。したがって, 材料が塑性変形をうける時の環境(ひずみ速度, 成形温度)により ϵ_L と V_L がどのように変化するかを理解することで, フルーティング(折れ)の形態と成形条件との関係を解明することができる。

そこで, 引張速度および試験温度を変えて引張試験を行い, その際のリュウダース帯の伝播を観察することにより, リュウダースひずみ ϵ_L , リュウダース帯の伝播速度 V_L と, ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ および引張試験温度 T との関係を調べた。ひず

み速度 $\dot{\epsilon}$ に対する V_L および ϵ_L の関係をFig. 9に, また, 温度 T に対する V_L および ϵ_L の関係をFig.10に示す。 V_L は $\dot{\epsilon}$ の上昇にともない上昇するが, $\dot{\epsilon}$ が 2×10^{-2} 以上の高ひずみ速度域では飽和する傾向にある。作井らは軟鋼の衝撃引張試験により, リュウダース帯の伝播速度 V_L とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係を解析している^{12,13}。作井らによれば, V_L はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の上昇にともない, 大きくなるが, ある上限値を有し, それ以上の高速の衝撃的引張試験に対してはリュウダース帯の伝播が追従できなくなることを説明している。Fig. 9に示した結果は作井らの行った衝撃引張試験と比較してひずみ速度の範囲が異なるものの, V_L のひずみ速度依存性については同様の傾向を示している。

一方で, Fig.10より, リュウダース帯の伝播速度 V_L は温度の低下とともに単調に減少している。R.Beckerらによれば, 一定の降伏応力に対して, 試験温度の低下は歪み速度を増加させるのと同様の効果をもつことがいわれている¹⁴。それゆえ, Fig. 9とFig.10の結果は本質的に等価な意味を示している。

一方で, Fig. 9およびFig.10より, 降伏点伸び ϵ_L はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の上昇, または温度 T の低下により増大することがわかる。降伏点伸び ϵ_L とひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ の関係についてはWinlockらによりFig. 9と同じ傾向を示す結果が示されている¹⁵。しかしながら, その理由についてははっきりしていない。

実験的に得られたこれらの関係を(2)式に代入し, リュ

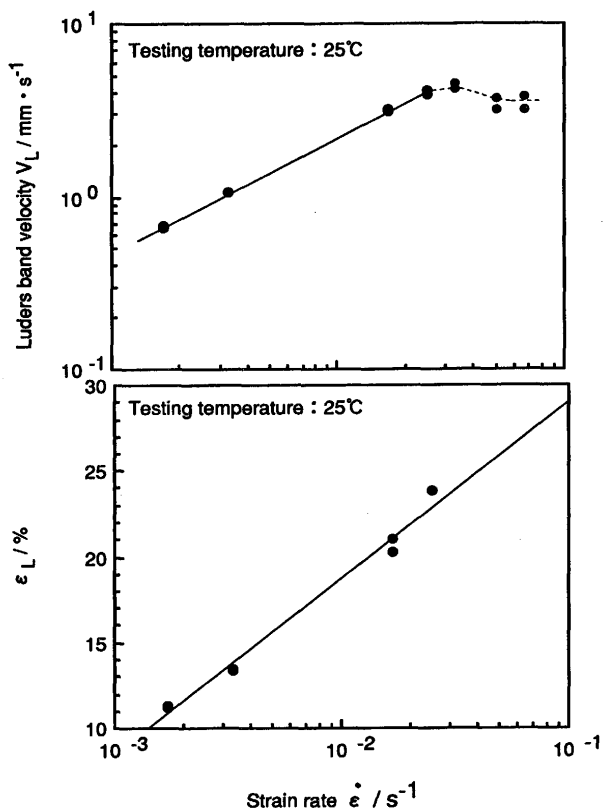


Fig. 9. Effects of strain rate on Luders band velocity and yield elongation.

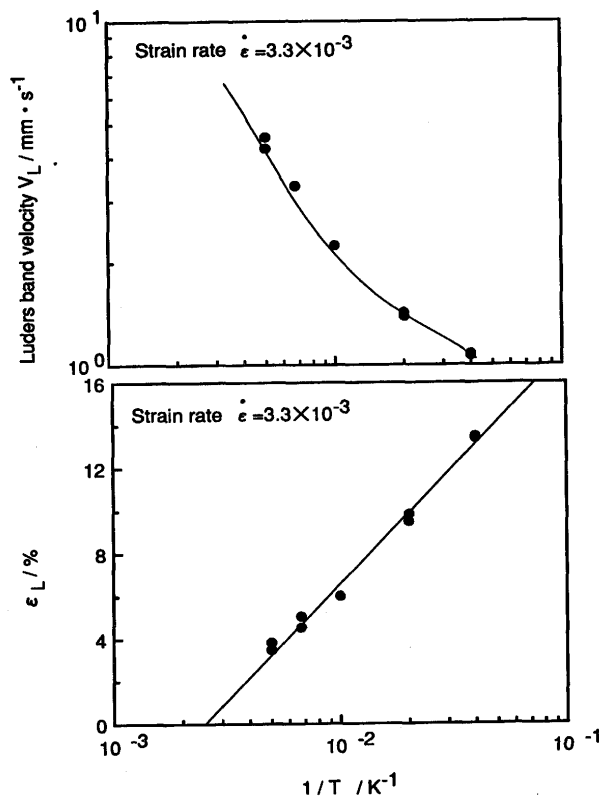


Fig. 10. Effects of testing temperature on Luders band velocity and yield elongation.

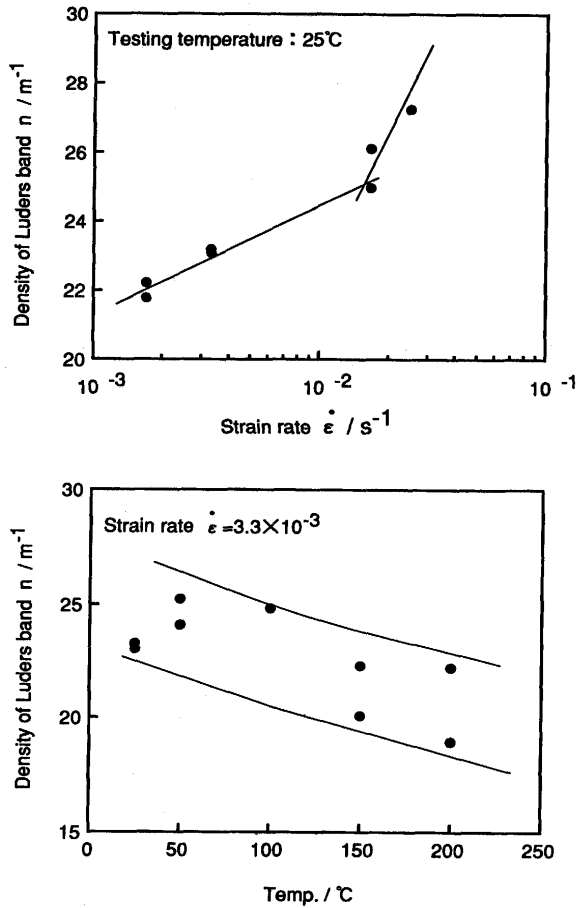


Fig. 11. Effects of strain rate and testing temperature on density of Luders band.

ーダース帯の密度 n と、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ および温度の関係を整理した結果をFig.11に示す。 n は $\dot{\epsilon}$ の上昇または温度の低下とともに増大しており、リュウダース帯の分散化が生じていることがわかる。とくに、あるひずみ速度を越えると n は急激に増加することがわかる。これは円筒成形試験の結果と対応しており、フルーティングの防止にはひずみ速度の上昇および成形温度の低下が有効であることが理論的にも解明できた。ただし、 n の値は、実際の円筒成形時に発生する“折れ”の密度に比べると、小さい値を示しているが、これは円筒成形時のひずみ速度と引張試験時のひずみ速度

の差に起因するものと考えられる。

5. 結言

低炭素アルミキルド鋼連続焼鈍材の製缶時のフルーティング(折れ)の発生に及ぼす成形条件の影響を調べ、時効性鋼板においても折れを発生させないための製缶条件について研究した。その結果、以下の結論が得られた。

(1)時効性を有する鋼板を製胴する際、実機製胴装置に付随するフレクサー加工により折れの発生は防止できる。

(2)上記フレクサー加工を受けることにより、塗装、焼付け処理後の完全時効状態であっても曲げ・曲げ戻し加工によるバウシinger効果が十分に発揮され、可動転位密度が増大するために、Y-EIおよびYSが顕著に低下し、同時に折れが防止される。

(3)折れはY-EIの大きい材料で発生しやすいが、成形速度の上昇および成形温度の低下により、リュウダース帯の束は板面全体にわたり分散化し、実質的に折れの発生を防ぐことができる。

文 献

- 1) 今津勝宏, 佐藤信行: 金属, **65** (1995), 393.
- 2) 今津勝宏: 鉄と鋼, **79** (1993), N103.
- 3) 東洋鋼鉄編: ぶりきとティンフリースチール, アグネ, (1974), 35.
- 4) 丸岡邦明: 鉄と鋼, **73** (1987), S1413.
- 5) 久々湊英雄, 加藤俊之, 西川 廣, 白石昌司, 下山雄二, 藤長千香子: 川崎製鉄技報, **23** (1991), 308.
- 6) 久々湊英雄, 泉山禎男, 角南秀夫, 柳島章也, 中里嘉夫, 小原隆史: 川崎製鉄技報, **14** (1982), 62.
- 7) T. Obara, K. Sakata, K. Osawa, M. Nishida and T. Irie: Proc. of Symp. on "Technology of Continuous Annealed Cold-Rolled Sheet Steel", ed. by R. Pradhan, TMS-AIME, Detroit, (1984), 363.
- 8) C. Fujinaga, A. Tosaka, T. Kato and H. Kuguminato: ISIJ Int., **34** (1994), 108.
- 9) 周藤悦郎: 鉄と鋼, **11** (1962), 1379.
- 10) 丸岡邦明, 吉永直樹, 菊間敏夫: 鉄と鋼, **81** (1995), 1180.
- 11) 登坂章男, 荒谷昌利, 久々湊英雄: 川崎製鉄技報, **27** (1995), 169.
- 12) 作井誠太, 森 勉: 日本金属学会誌, **28** (1964), 537.
- 13) 作井誠太, 森 勉: 日本金属学会会報, **3** (1964), 303.
- 14) R. Becker: Z. Phys., **26** (1925), 919.
- 15) J. Winlock and R.W.E. Leiter: Trans. ASM, **25** (1937), 163.