

ステンレス鋼板のエッジシーム疵抑制技術

山口 晴生*・草場 芳昭*・山田 建夫*

Improvement of Seam-defects on Strip Edge of Stainless Steel

Haruo YAMAGUCHI, Yoshiaki KUSABA and Tateo YAMADA

Synopsis : On the hot strip rolling, a sizing press is installed to change slab-width in stead of the vertical edgier mill. Operation of the sizing press has enabled the number of mold width changes to minimized. This has resulted in the potential monthly throughput of the caster increasing. Moreover, especially for stainless steel grades, the side seam defect can be much reduced by applying the convex die and thus trimming loss is much improved.

On the hot strip rolling of stainless steel grades, the side seam-defects tend to grow at the slab corner because of the temperature fall. Thus the new technique reducing the width of the side seam-defect by forming the slab edge into concave shape with the sizing press before rolling and preventing the sidth-spread on rolling were investigated. The slab deformation in sizing with convex dies was analyzed by FEM simulation and the most suitable profile of the die was decided for the improvement of trimming loss because of the side seam defect.

In this report, above simulation results of slab-deformation by sizing press are presented.

Key words : hot strip rolling ; sizing press ; stainless steel ; seam defect ; convex die ; FEM simulation.

1. 緒言

近年、熱間圧延鋼板および冷間圧延鋼板の表面性状に対して需要家の要求がますます厳しくなっている。特に、エッジドロップの改善に伴う余幅量の減少等により、従来軽視されていた鋼板端部の表面疵の抑制が重要課題としてクローズアップされている。この鋼板端部の表面疵の主なものは、圧延方向に平行に生じる線状疵であり、一般的にシーム疵と呼ばれている。発生原因としては、被圧延材の側面に既存した疵や圧延工程で鋼板端部に発生した疵・凹凸状のしわ等が、板厚方向圧下に伴い生じる圧延材の幅広がりにより側面部から表面端部へ回り込み、残存したものであることが知られている¹⁾。

特に、ステンレス鋼板の熱間圧延ではシーム疵が発生しやすくシーム疵の部分はトリムしなければならないため、製品コイル幅の歩留および品質向上を図る上でシーム疵の抑制が重要課題となっている。そこで、スラブ幅調整設備として導入したサイジングプレスを用い圧延前に素材スラブ側面を凹状に造形しロール圧下に伴う幅広がりを抑え、圧延による鋼板側面の製品表面への回り込みを抑制することにより、シーム疵が発生する領域の幅を減少させる方法について検討した。

本研究では、スラブ幅圧下時および熱間圧延中のスラブ端部の変形挙動をFEM解析により調査し、金型形状を最適

化することによりシーム疵によるトリム量の低減することを目的としている。

2. シーム疵抑制技術

2.1 シーム疵の発生メカニズム

ステンレス鋼板の熱間圧延では、初期圧延段階において表層部の幅広がり量がロールによる固着やスラブ断面内の温度差により板厚中心部の幅広がり量に比べて小さいことやスラブエッジ部での温度低下により、スラブ側端部にしわが発生する。更に圧延を進行させると圧延材の幅広がりにより側端部のしわが鋼板の上下平坦面に回り込み、しわの部分で材料がオーバーラップし線状疵として鋼板表面に残存する (Fig. 1)。この線状疵はシーム疵と呼ばれ、シーム疵の除去による製品コイル幅の歩留低下は数%にもおよび、歩留低下の主たる原因となっている。

2.2 シーム疵抑制方法

シーム疵の発生要因としてはロール圧下に伴う圧延材の幅広がりが考えられ、これまで、シーム疵抑制技術として孔型ロールによるスラブコーナ面取り成形法²⁾およびスラブ側面凹造形法が検討されてきた。コーナ面取り成形法は温度低下の大きいコーナ部を面取り成形することによりシーム疵の発生原因であるスラブコーナ部のまくれ込みを防止する方法であり、スラブ側面凹造形法は、スラブ側面を凹

造形し熱間粗圧延の最終パス段階で鋼板側端面がちょうど平坦になるか、または、2重以上の浅い折れ込み疵を発生させることにより、スラブ側面が製品表面へ回り込むことを抑え、シーム疵の発生領域幅を減少させる方法である。

しかし、これらの方法ではFig. 2 (a) に示すように孔型ロールを用いてスラブ上下面を拘束しながら側面を造形するため、孔型底部とスラブを拘束する孔型エッジ部では周速度が異なり、スラブの接触表面との間に速度差が生じるためロール掻き疵が発生し、製品段階まで残存するという問題がある。

当社の鹿島製鉄所熱延工場では、Fig. 3 に示すように、加熱炉と粗圧延機の間にはスラブ幅調整を目的とするサイジングプレス（Sizing Press）を有していることから、Fig. 2 (b) に示すようにプレス金型を凸状にし、スラブ上下面を拘束せずにスラブ側面を凹造形する方法を検討した。

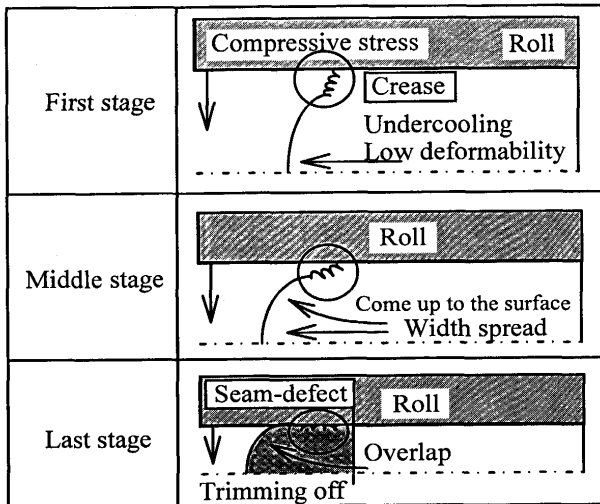


Fig. 1. Mechanism of Seam-defects growth.

2.3 走間式サイジングプレス

Fig. 4 に当社のサイジングプレスの構造を示す。当社のサイジングプレスは走間式であるためスラブを停止させることなく幅圧下することが可能である。金型は主クランクシャフトにより幅方向に移動すると同時に走間機構によりスラブの進行速度と同じ速度で進行方向に移動する。また、幅圧下時の座屈防止のため、金型間中央には幅の狭い座屈支持ロールを有している。

3. スラブ側面造形条件の最適化

3.1 ステンレス鋼の幅広がり特性

スラブ側面の凹造形法としてサイジングプレスによる鍛造法を前提とし、金型形状および幅圧下量を変化させて鍛造した後熱間圧延をした場合の粗圧延終了時のシーム疵の発生領域幅の変化を一般化平面ひずみ変形に基づく剛塑性FEM解析³⁾および鉛材による圧延実験により調査し、スラブ側面造形条件の最適化を行った。

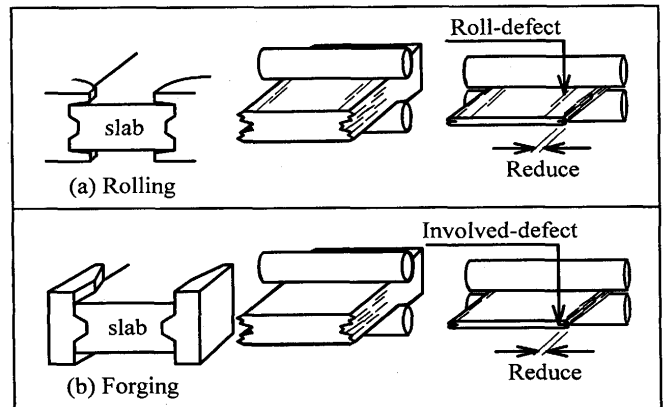
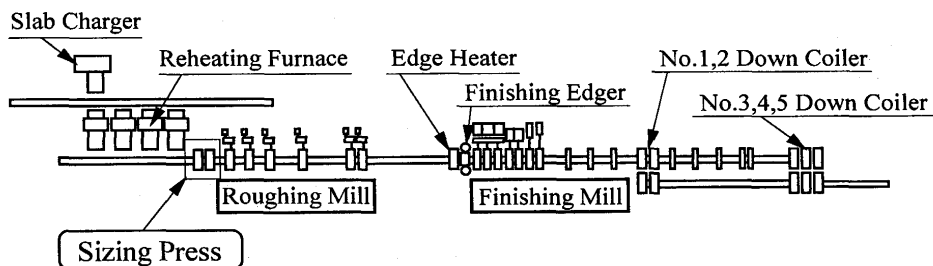


Fig. 2. Edge forming technique to reduce seam-defect-width.



Roughing Mill		Finishing Mill	
<R1 R2 R3>		Type	4Hi Continuous
Type	2Hi Non-Reverse	<F1 - F4>	
Work Roll	φ1300 x 1800 mm	Work Roll	φ800 x 2080 mm
<R4 R5 R6>		<F5 - F7>	
Type	4Hi Non-Reverse	Work Roll	φ770 x 2080 mm
Work Roll	φ1100 x 1780 mm	Backup Roll	φ1570 x 1780 mm
Backup Roll	φ1570 x 1780 mm		

Fig. 3. The layout of hot strip mill in Kashima Steel Works.

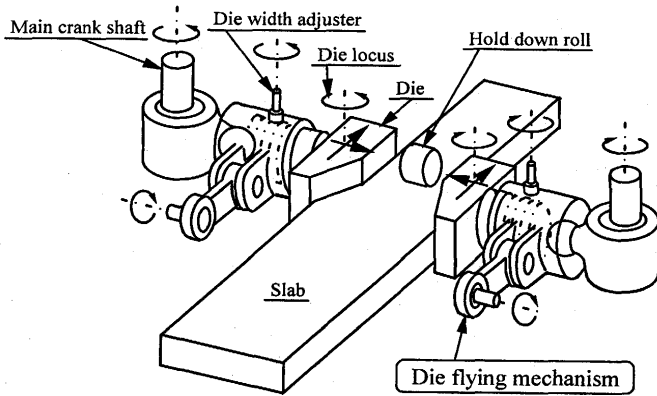


Fig. 4. The mechanism of flying type sizing press.

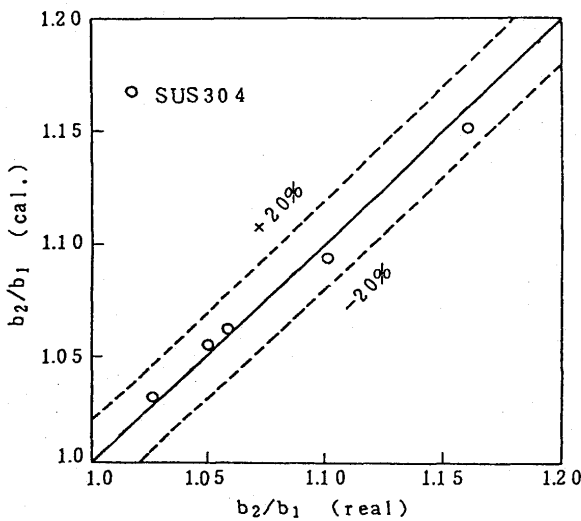


Fig. 5. Accuracy of width spread ratio equation.

一般化平面ひずみ変形に基づく剛塑性FEM解析では、延伸量を未知量として与え解析を行うことが出来ないため延伸方向に外力を与える必要がある。そこで、鍛造解析の場合は圧下時の延伸方向の外力が零となるように計算し、圧延解析の場合は粗圧延各パスの圧下率での幅広がり量が圧延実験により得られた幅広がり推定式の値と一致するように外力を与え、鋼板側端部の変形解析を行った。幅広がり推定式は、温度・鋼種を考慮したWusatovski式⁴⁾を基本式とし、SUS304材と工業用純鉛材を用いた圧延実験により各材料の幅広がり推定式を決定した。また、粗圧延各パスでの幅広がり量は、エッジ部の不均一変形を平均化した値を用いた。

SUS304材と工業用純鉛材の幅広がり特性は類似しており式(1)で示され、実験値と比較するとFig. 5に示すように、誤差は±20%以内であることから、鉛材による圧延実験によりSUS304材の幅広がり量を推定することが可能である。

$$\frac{b_2}{b_1} = 1.0233BF \gamma_m^{wm} \dots\dots\dots (1)$$

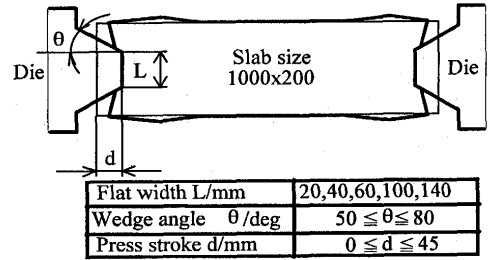


Fig. 6. Profile of die and press condition.

Table 1. Analysis condition.

Material	SUS304
Temperature	1000°C
Flow stress	$\sigma = 236.8 \epsilon^{0.43} \dot{\epsilon}^{0.067} \text{N/mm}^2$
Roll revolution speed	0.5m/s
Friction coefficient	0.25

Table 2. Pass schedule of rolling.

Stands	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Thickness mm	138	92	56	40	29	20
Reduction %	31	33	39	29	28	31

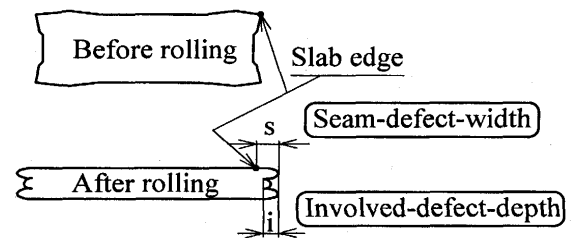


Fig. 7. Seam-defect-width: s and involved-defect-depth: i.

- B: 圧延速度係数 $0.4 \leq v \leq 17.0 \text{ (m/s)}$
- $B = (0.002985 + 0.00431 \gamma_m) v + 1.07168 - 0.10431 \gamma_m$
- F: ロール表面係数 1.02 (鑄鉄ロール)
- b_1, b_2 : 板幅 t_1, t_2 : 板厚
- $W_m = 10^{-1.289} \epsilon_m^{0.556} \sigma_m$
- $\epsilon_m = t_1 / D_m$ (t_1 : 入側板厚)
- $\sigma_m = b_1 / t_1$ (b_1 : 入側板幅)
- $\gamma_m = t_2 / t_1$ (t_2 : 出側板厚)
- $D_m = D_{\text{ピッチ}} - t_2$

3・2 FEM解析および実験条件

SUS304について、スラブ側面をFig. 6に示す条件で幅圧下した後、Table. 1, Table. 2に示す条件で粗圧延を行った場合の鋼板側面の形状をFEM解析により調べた。スラブ側面凹造形を行った場合、粗圧延後の鋼板側面はFig. 7に示すような形状になり、板厚中央部に折れ込み疵が発生する。

折れ込み疵の深さがシーム疵の発生領域幅より大きくなると、折れ込み疵がコイル幅の歩留低下の原因となることから、シーム疵発生領域幅sおよび折れ込み疵深さiを測定し、シーム疵および折れ込み疵の除去によるコイル幅の歩留低下を最小にする造形条件の推定を行った。ただし、FEM解析ではシーム疵の発生を現象的に得ることが不可能であるので、シーム疵発生領域幅は鋼板側端からスラブ角点までの距離と仮定した。また、FEM解析の妥当性を検討するために、工業用純鉛材を用いた圧延実験を行い、シーム疵発生領域幅および折れ込み疵深さについてFEM解析結果との比較を行った。工業用純鉛材の変形抵抗式は式(2)を用いた。変形抵抗式中の ϵ は相当ひずみ、 $\dot{\epsilon}$ は相当ひずみ速度である。

$$\sigma = 35.3 \cdot \epsilon^{0.272} \cdot \dot{\epsilon}^{0.045} \text{ (N/mm}^2\text{)} \dots\dots\dots (2)$$

4. FEM解析および実験結果

4.1 スラブ側面造形条件の最適化

Fig. 8 にFEM解析で得られたプレス後と粗圧延後の鋼板側面の断面形状の例(1/4断面)を示す。プレス成形を行わなかった場合、シーム疵発生領域幅は約20mmとなっている。それに対し、凸型金型を用いてスラブ側面を凹造形することにより、シーム疵発生領域幅を低減することが可能となっている。折れ込み疵は、狭くて深い凹造形を行った場合、板厚中央に1段の深い折れ込み疵が生じ、金型の平坦部を大きくすると圧延時に平坦部に幅広がりが生じ、折れ込み疵は2段になり、疵の深さも浅くなることが確認された。

以上の結果から、粗圧延後のスラブ側面形状はFig. 9のCase 1のように中央部が折れ込む場合とCase 2のように中央部に幅広がりが生じ2段に折れ込む場合に分けられ、コイル幅の歩留向上の点で最適な側面形状はCase 3のように折れ込み疵が2段になり、かつ、シーム疵発生領域幅と折れ込み疵深さが等しくなる場合である。そこで、各金型形状について幅圧下量とシーム疵発生領域幅および折れ込み

疵深さの関係を調査した(Fig.10)。

金型形状の影響は、シーム疵発生領域幅については小さく、折れ込み疵については平坦部幅およびテーパ角度の増加に伴い浅くなることが確認された。また、幅圧下量の増加に伴いシーム疵発生領域幅は小さくなるが、折れ込み疵が深くなる。ただし、平坦部幅およびテーパ角度については平坦部幅140mm、テーパ角度80°の場合に見られるように、それ以上大きくしてもプレスによる側面の凹造形深さが変化しないため、改善効果が向上しない上限値が存在することも確認された。

粗圧延最終パスでFig. 9のCase 3のような鋼板側端部形状になる側面凹造形条件はFig.10の★印で示されており、コイル幅の歩留向上に対する最適側面造形条件は平坦部幅L=100mm、テーパ角度 $\theta=70^\circ$ 、幅圧下量d=45mmである。最適造形条件で幅圧下した場合の粗圧延後の鋼板側端部の断面形状はFig.11のようになり、シーム疵発生領域幅と折れ込み疵深さはほぼ等しく、疵による鋼板側端部の切り取り幅は側面凹造形を行わなかった場合の約1/4となっている。

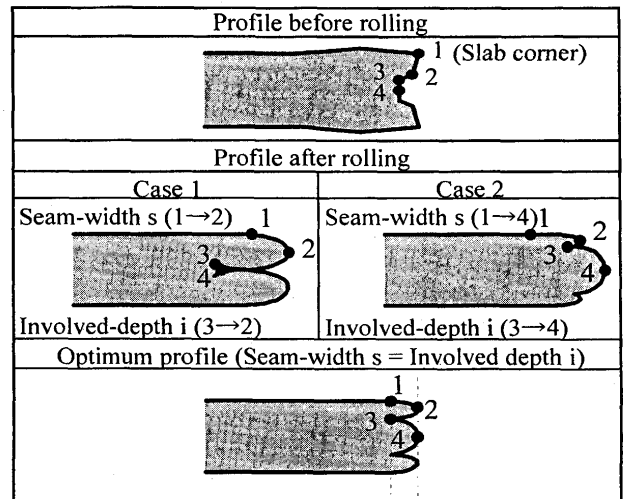


Fig. 9. Typical edge profiles and optimum profile after rolling.

Dies	No press	L= 60 $\theta= 50$ d= 45	L=100 $\theta= 50$ d= 30	L=100 $\theta= 70$ d=30
Profile				
Before Rolling (t=200)				
After Rolling (t=20)	Seam defect s 19.6 Involved defect i 0.0	3.6 16.1	8.0 6.9	7.8 3.1

Fig. 8. Example of edge profile before and after rolling with calculation results (1/4 cross section).

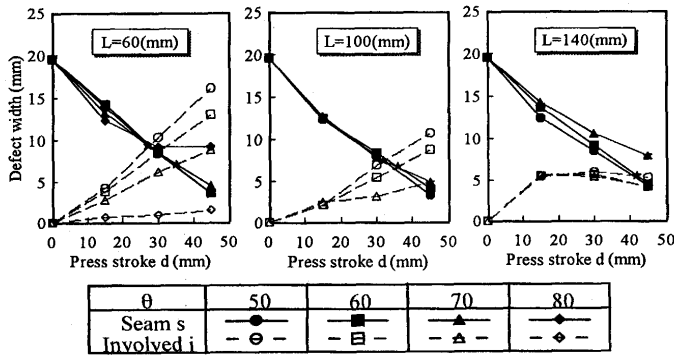


Fig. 10. Relation between Seam - defect - width, Involved-defect-depth and press stroke(FEM simulation results).

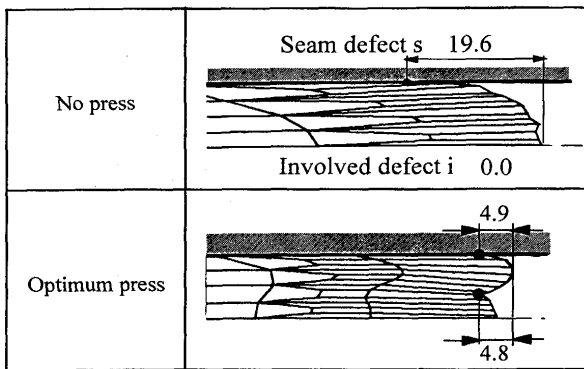


Fig. 11. Edge profile after rolling in case of no sizing and sizing in optimum press condition.

4・2 鉛圧延実験結果

金型の各平坦部幅についてテーパ角度とシーム疵発生領域幅および折れ込み疵深さの関係をFig.12に示す。テーパ角度の増加に伴い折れ込み疵深さは減少するが、シーム疵発生領域幅に対しては影響が小さい。また、平坦部幅についても広くすることにより折れ込み疵深さは減少するが、シーム疵発生領域幅はほとんど変化していない。

FEM解析結果と比較するとシーム疵発生領域幅および折れ込み疵深さともよく一致していることから、FEM解析による鋼板側端部の変形解析は十分可能であり、シーム疵抑

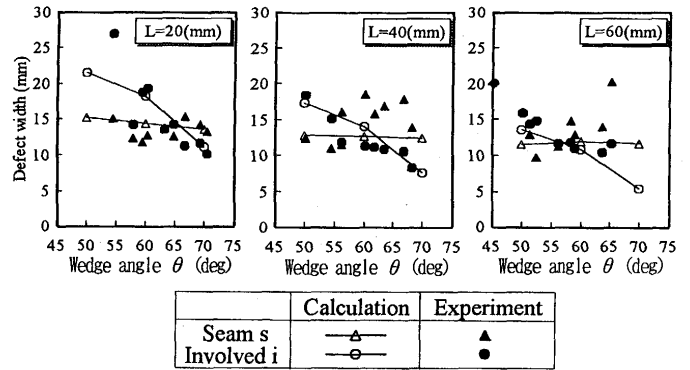


Fig. 12. Relation between Seam - defect - width, Involved-defect - depth and Wedge angle with experimental results (Press stroke $d=45$ mm).

制のためのスラブ側面凹造形条件の最適化をFEM解析により実施することが可能であることが確認された。

5. 結言

ステンレス鋼板のエッジシーム疵抑制技術としてサイジングプレスによるスラブ側面凹造形法を適用し、近似3次元FEM解析と鉛圧延実験により金型形状および幅圧下量がシーム疵抑制効果に及ぼす影響を調査した。スラブ側面を凹造形する際、金型形状およびプレス量を最適化し鋼板側端部のシーム疵発生領域幅および折れ込み疵深さを最適化することにより、シーム疵による製品コイル側端部の切り捨て幅を大幅に削減することが可能となり、製品コイル幅の歩留向上が期待できる。また、今回、FEM解析によりスラブ側面凹造形条件の最適化を実施した結果、従来の実験的手法に対して大幅な開発費用の削減と設計期間の短縮を実現することが可能となった。

文 献

- 1) 宍戸正和, 上鍛治弘: 材料とプロセス, 6 (1993), 1353.
- 2) 久富木行治, 大坪稔典, 倉繁 裕, 堀 裕二: 材料とプロセス, 3 (1990), 1364.
- 3) 小坂田, 古元: 第37回塑性加工連合講演会講演論文集, (1986), 363.