

ステンレス鋼板の冷間タンデムミル圧延における耐焼付き性評価

小豆島 明*・森田 保弘*²・井上 徹*³

Evaluation of Anti-seizure Property in Cold Tandem Mill of Stainless Steel

Akira AZUSHIMA, Yasuhiro MORITA and Toru INOUE

Synopsis : In order to produce the strip with high productivity in cold rolling of stainless steel, tandem mills have been used. Under the circumstance, tribological problems such as friction pick up and reduction of surface brightness occurred. The purpose of this study is to evaluate the anti-seizure property in cold rolling of stainless steel. In order to evaluate the property, evaluating system by means of the developed simulation testing machine by the author is used. The coefficient of friction and the limitation line of friction pick up are measured and the interface temperatures which the friction pick up occurs are calculated from the experimental data. From these results, the maximum rolling speed in actual tandem mill of stainless steel is estimated. By means of the evaluating system, it is estimated that the maximum rolling speed in tandem mill with lubricant having high lubricity is about 200 m/min.

Key words : cold rolling; stainless steel; coefficient of friction; friction pick up; interface temperature; evaluating system.

1. 緒言

ステンレス鋼板の最近の需要の伸びに対応して、普通鋼メーカーにおいてタンデムミルを用いたステンレス鋼板のエマルジョン潤滑による圧延が行われている。しかし、従来のZミルなどの小径ロールとは異なり、大径ロールを用いるため、材料表面の光沢低下および焼付き発生という二つの大きな問題に直面し、生産性を維持するまでには至っていない。

ステンレス鋼板の表面光沢に関しては、著者の一人らがニート潤滑において、入口部での導入油量と表面光沢との関係を用いることにより圧延後の表面光沢を推定しうるシステムを提案し^{1,2)}、さらにこの推定システムが実機に適用できることを示した³⁾。

一方、ステンレス鋼板の焼付きに関しては、普通鋼板に比べて非常に発生し易いことが定性的に理解されているものの、定量的に把握されるまで至っていないのが現状である。普通鋼板の耐焼付き性に関しては、著者の一人らが耐焼付き性評価が可能な潤滑性評価試験機を開発しており^{4,5)}、この評価試験機を用いて実機における耐焼付き性を評価しうる評価システムを提案している⁶⁾。しかし、ステンレス鋼板においては現在大径化、高速化による焼付き性が非常に問題になっているにもかかわらず、普通鋼板のように定量的な研究がなされていない。

本研究は、著者の一人が開発した潤滑性評価試験機⁴⁾を

用いて提案した耐焼付き性評価⁶⁾をステンレス鋼板にも適用できるのかを確認し、タンデムミル用エマルジョン圧延油の耐焼付き性の定量的な評価を行った。その評価結果を評価システムに適用することにより、実機のタンデムミルにおけるトライボロジー設計を行った。

2. ステンレス鋼板の耐焼付き性評価方法

2.1 潤滑性評価試験機

潤滑性評価試験機の概略図をFig. 1に示す。この評価試験機は、本体の2段圧延機①とコイル材料③の移動速度をコントロールするための材料移動制御圧延機②の二つの圧

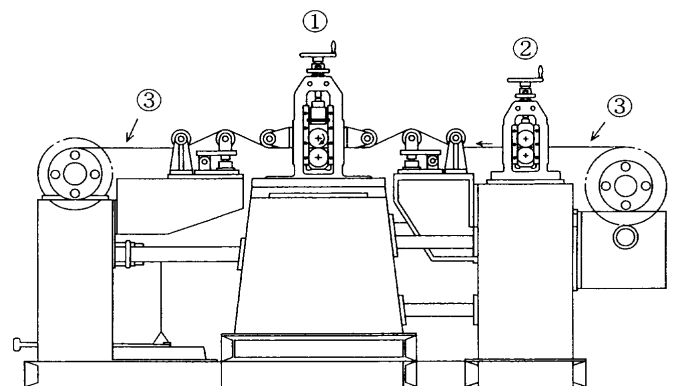


Fig. 1. Schematic representation of simulation testing machine for evaluation of lubricity of rolling oil.

平成10年7月31日受付 平成11年3月23日受理 (Received on July 31, 1998; Accepted on Mar. 23, 1999)

* 横浜国立大学工学部 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai Hadogaya-ku Yokohama 240-8501)

* 2 横浜国立大学大学院生 (現: NKK 京浜製鉄所) (Graduate Student, Yokohama National University, now Keihin Works, NKK Corp.)

* 3 横浜国立大学学生 (現: 富士ゼロックス (株)) (Student, Yokohama National University, now Fuji Xerox Co., Ltd.)

Table 1. Properties of lubricant used.

Lubricant	Viscosity (cSt : 40°C)	Acid value (mg KOH/g)	Saponification value (mg KOH/g)
A	21.0	0.7	19
B	19.0	12.0	281

延機とコイル材の巻出し機と巻取り機から構成されている。焼付き易いステンレス鋼板の冷間圧延において耐焼付き性を評価するため、この試験機の圧延機②に取り付けられた減速比1/10の減速機を無段減速機に交換し、②の圧延機のロール速度を①の圧延機のロール速度の従来の1/10から、1/10から8/10まで可変できるようにした。この試験機の詳細については前報⁴⁾に示してある。

2.2 実験方法

供試材料としては、板厚0.4mm、板幅25mmのSUS430ステンレス鋼板の表面がBA仕上りのコイル材料を用いた。その降伏応力は306MPaである。圧延機①のロールは、ロール径φ76mmのSUJ-2製で、その表面は各試験ごとに#600のエメリ紙で研磨し、ほぼ一定の表面粗さRa 0.05μmに管理した。使用した圧延油は、ステンレス鋼用の商業用エマルジョン圧延油Aで、その粘度、酸価およびケン化価をTable 1に示す。供試圧延油としてはエマルジョン濃度を10wt%とし、55~60°Cに保温して1l/minの流量で循環使用した。ステンレス鋼板における耐焼付き性を評価するための圧延機②のロールの最適減速比を決定するため、2/10、4/10および6/10の3段階の減速比を選んだ。

耐焼付き性を評価するための試験方法を以下に示す。圧延機①の上ロールを研磨・脱脂後、試験コイル材③をFig. 1のようにセットする。つづいて、圧延機②の圧下スクリーンで上ロールをコイル材に押し込み、約5%圧下率で圧延する。圧延されたコイル材がメインスタンドを通過した時点でいったん圧延を止め、それまで開放されていた圧延機①の上ロールを圧下スクリーンで圧延されたコイル材に押し込む。つづいて、圧延油の供給並びに圧延荷重および張力の測定を開始し、圧延機①により所定の上ロール速度および圧下率で80cmの距離のすべり圧延を行う。そのとき、圧延機①の下ロールは下部ジョイントをはずして従動状態にしてある。この結果、コイル材料はほぼ圧延機②のロール速度で移動し、圧延機①の上ロールは減速比に対応して、それぞれ10/2、10/4および10/6倍で回転する。エマルジョン圧延油は上・下ロールとコイル材料の間にフラットノズルを用いて給油し、循環使用する。

焼付き発生 の判定は、圧延後の上ロールおよびコイル材料の表面の目視観察並びに後方張力の変化から行った。

2.3 実験結果

Fig. 2に2/10、4/10および6/10の3段階の減速比における

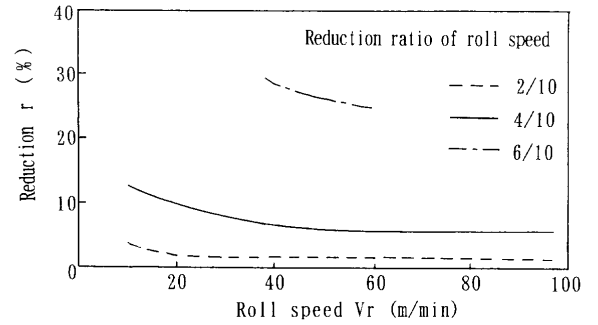


Fig. 2. Limit conditions of friction pick up.

焼付き限界線の結果を示す。2/10の減速比では、すべてのロール速度範囲において低い圧下率で焼付きが発生している。逆に、6/10の減速比では圧下率を高くしても明瞭な焼付きが発生しない場合があり、4/10の減速比では前報⁵⁾で示した普通鋼板と同様な焼付き限界圧下率が得られている。この結果から、潤滑性評価試験機を用いてステンレス鋼板の耐焼付き性評価を行う場合、減速比として4/10を選定した。

3. タンデムミル用エマルジョン圧延油の耐焼付き性評価

3.1 実験方法

タンデムミル用エマルジョン圧延油として、前章で用いた圧延油AとTable 1に示す高潤滑性の圧延油Bの2種類の市販のステンレス鋼板用圧延油を用いた。圧延油は、それぞれ10wt%エマルジョンとし、55~60°Cに保温し、1l/minの流量でロールとコイル材料間に噴霧し、循環使用した。

供試材料としては、板厚0.4mm、板幅25mmのSUS430ステンレス鋼板の表面がBA仕上りのコイル材料を用いた。圧延機①のロールはSUJ-2製で、その表面は各試験ごとに#600のエメリ紙で研磨し、ほぼ一定の表面粗さRa 0.05μmに管理した。

耐焼付き性の評価のために、潤滑性評価試験機の減速比を4/10とし、圧延機①の上ロール速度を24、48、および96m/minの3段階とし、焼付きが発生するまで段階的に圧下率を増加してすべり圧延を行った。その際、圧延荷重Pと後方張力Tを測定し、次式から摩擦係数μを求めた。

$$\mu = \frac{T}{P} + \alpha \dots \dots \dots (1)$$

ここで、αはかみ込み角である。

3.2 実験結果

Fig. 3およびFig. 4に2種類の圧延油AおよびBの各ロール速度における摩擦係数と圧下率の関係を示す。2種類の圧延油とも各ロール速度において摩擦係数は圧下率には依存せずほぼ一定で、ロール速度の増加とともに減少している。

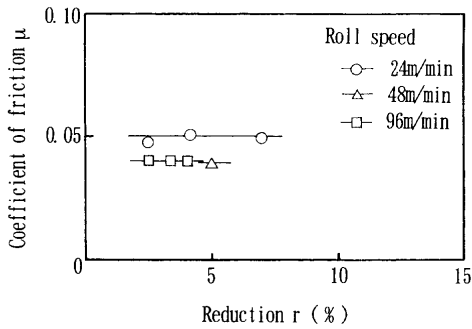


Fig. 3. Relationship between coefficient of friction and reduction for lubricant A.

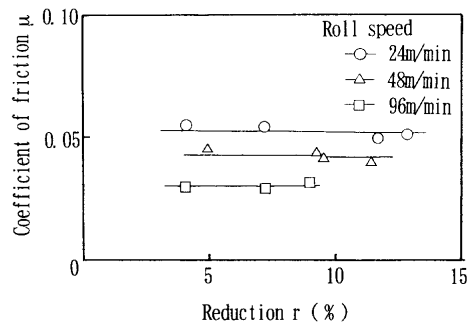


Fig. 4. Relationship between coefficient of friction and reduction for lubricant B.

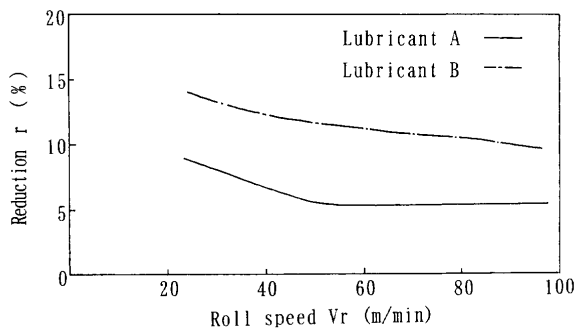


Fig. 5. Limit conditions of friction pick up of lubricants A and B.

Fig. 5に2種類の圧延油AおよびBの焼付き限界の結果を示す。高潤滑性の圧延油Bの方の焼付き限界圧下率が圧延油Aに比べて各ロール速度とも約5%も高い。この結果を評価システムに適用するために、圧延油AおよびBの焼付き限界界面温度の推定を行う。本推定には材料変形による温度上昇を考慮に入れるため、その平均温度上昇 T_{mwd} を

$$T_{mwd} = \frac{\sigma_m \epsilon_m}{\rho c} \dots\dots\dots (2)$$

で与えた。ここで、 σ_m は材料の平均変形抵抗、 ϵ_m は平均塑性ひずみ、 ρ は材料の密度、 c は材料の比熱である。そして、ロールおよび材料の入口部での温度をそれぞれ T_m 、 T_{ro} とすると、すべり圧延中の平均界面温度 T_m は

$$T_m = \frac{1}{4.24K_w + 3.76K_r} \left[\frac{V_r \cdot l}{\kappa_r} \right] \times$$

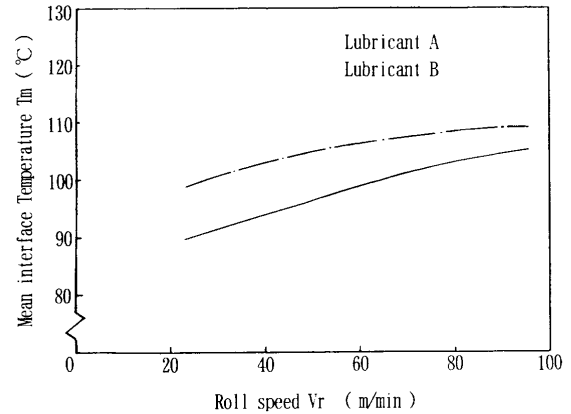


Fig. 6. Interface temperature of lubricants A and B when the friction pick up occurs.

$$\left\{ 4l \cdot \mu \cdot p_m \cdot \Delta V + 3.76K_r \left[\frac{V_r \cdot l}{\kappa_r} \right]^{1.2} \cdot T_{ro} + 4.24K_w (T_{ro} + T_{mwd}) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる⁷⁾。ここで、 K_r および K_w はロールおよび材料の熱伝導率、 κ_r はロールの温度伝導率、 l は接触弧長の1/2、 V_r はロール速度、 ΔV は平均相対すべり速度、 μ は摩擦係数、 p_m は平均面圧である。圧延油AおよびBの各ロール速度において限界近傍における各実験データを用いて、(3)式より焼付き限界界面温度を計算した。この結果をFig. 6に示す。

圧延油Bの焼付き限界界面温度は、圧延油Aに比べて各ロール速度で高く、圧延油Bが圧延油Aに比べ焼付きが発生しづらいことが理解できる。つづいて、この結果を用いて評価システムによる耐焼付き性の評価を試みる。

4. 評価システムによる耐焼付き性評価

4.1 実験方法

実験室用圧延機としては、Fig. 1の潤滑性評価試験機の圧延機②の上・下ロールを取外して、圧延機①の下ロールの下部ジョイントを接続し、通常のコイル圧延ができるようにしたものを使用した。供試材料、ロールおよび圧延油は前章と同じものを用いた。

通常圧延は圧延速度を96 m/minと一定とし、圧下率を段階的に増加させ50mのコイルを圧延中に焼付きが発生するかしないかを観察し、焼付きが発生する圧下率を求めた。

4.2 実験結果および考察

圧延油AおよびBの圧延速度96 m/minでの通常圧延における焼付き発生状況をTable 2に示す。圧延油Aにおいては圧下率30および32%で焼付きは発生せず、圧下率35%で焼付きが発生した。一方、圧延油Bにおいては圧下率30および35%で焼付きは発生せず、圧下率38および43%で

Table 2. Friction pick up occurrence at a rolling speed of 96 m/min.

Lubricant	Reduction (%)	Evaluation of pick up
A	30	○
	32	○
	35	×
B	30	○
	35	○
	38	×
	43	×

○ : no occurrence of pick up
 × : occurrence of pick up

焼付きが発生した。この結果から、圧延油Aでは圧下率34%以上、圧延油Bでは圧下率37%以上で焼付きが発生することがわかる。この通常圧延における焼付き限界圧下率の結果を評価システムにより考察する。圧延速度96 m/minの通常圧延のロールと材料間の界面条件に対応する評価試験機によるすべり圧延のロール速度としては、前報⁶⁾より約20 m/minの値が求められる。そこで、評価システムに用いるすべり圧延の実験結果としてロール速度24 m/minの結果を用いた。Fig. 6より、圧延油AおよびBのロール速度24 m/minの平均界面温度として90°Cと98°Cが得られている。またFig. 3およびFig. 4より、その条件の圧延油AおよびBの摩擦係数として0.050と0.052が得られている。一方、通常圧延における平均界面温度 T'_m は

$$T'_m = 1.06 \frac{l\mu p_m \Delta V}{(V_r L)^{1/2} \left[\frac{K_r}{\kappa_r^{1/2}} + \frac{K_w}{\kappa_w^{1/2}} \right]} + \frac{\left[\frac{K_r}{\kappa_r^{1/2}} \right] T_{ro} + \left[\frac{K_w}{\kappa_w^{1/2}} \right] (T_{wo} + T_{mwd})}{\frac{K_r}{\kappa_r^{1/2}} + \frac{K_w}{\kappa_w^{1/2}}} \quad (4)$$

で与えられる⁷⁾。ここで、 ΔV はロールと材料界面での平均相対すべり速度、 κ_w は材料の温度伝導率である。

ここで、(4)式の圧延油AおよびBの通常圧延における平均界面温度 T'_m を90°Cと98°Cとして、摩擦係数の実験値および(3)式の計算のときに用いた実験値より、接触弧長を逆算し、通常圧延における焼付き限界圧下率を求めた。その結果として求められた圧下率の値は、圧延油Aで35%で、圧延油Bで39%となり、通常圧延の実験で得られたTable 2に示す焼付き限界圧下率と良い一致を示した。

この結果は、耐焼付き性の評価システムがステンレス鋼板の冷間圧延においても有効に適用できることを示している。つづいて、圧延油AおよびBを実機のタンデムミルに使用した際のトライボロジー設計することを試みる。

5. タンデムミルにおけるトライボロジー設計

圧延油AおよびBをTable 3に示す圧延条件をもつタン

Table 3. Typical rolling conditions in tandem mill.

Stand	1	2	3	4	5	
Roll diameter (mm)	500	500	500	500	500	
Thickness of strip (mm)	2.5	1.8	1.4	1.0	0.8	0.7
Reduction (%)	28	22	29	20	13	
Rolling speed (m/min)	39	50	70	88	100	
	78	100	140	175	200	

デムミルに使用するときのトライボロジー設計を行う。タンデムミルは5スタンドで各スタンドのロール径は一定の500 mmとし、初期板厚が2.5 mmのコイル材を2.5→1.8→1.4→1.0→0.8→0.7 mmとのパススケジュールで圧延を行う条件を設定した。クーラント温度は50°Cとして、1スタンドの入口の材料表面温度 T_{wo}^1 および各スタンドロール表面温度 $T_m^1 \sim T_m^5$ をクーラント温度 T_{co} と同じ温度と仮定した。各スタンドの平均界面温度は(4)式および各スタンド間には次のニュートンの冷却式⁸⁾

$$T_s = T_{co} + (T_m - T_{co}) \exp \left(- \frac{2HL}{Vpch} \right) \quad (5)$$

を用いて板表面温度 T_s を計算した。ここで、 H は熱伝達率、 L はスタンド間隔、 V は板速度、 h は板厚である。圧延速度としては最終スタンドの圧延速度を100 m/minおよび200 m/minの2条件として、Table 3に示す各スタンドの圧延速度を決めた。計算には中島ら⁹⁾の冷間圧延ラインでの圧延材の温度変化の解析方法を用い、熱伝達率 H を3400 W/(m²·K)、スタンド間隔 L を4.5 m、材料密度 ρ を7800 kg/m³および比熱 c を420 J/(kg·K)とした。

圧延油Aの最終圧延速度100 m/minの場合の板表面温度の変化をFig. 7および圧延油Bの200 m/minの場合の結果をFig. 8に示す。このFig. 7の計算結果から圧延油Aでは、圧延速度100 m/minにおいて4スタンドの界面の板表面温度が92°Cとなり、前章で求めた圧延油Aの焼付き限界平均界面温度90°Cを越えていることがわかる。その結果から、圧延油Aをこの圧延条件のタンデムミルに使用すると圧延速度が100 m/min以下でも焼付きが発生することになる。一方、Fig. 8から圧延油Bでは圧延速度200 m/minの4スタンドの界面の板表面温度が97°Cとなり、焼付き限界平均界面温度98°Cを越えていない。圧延油Bを使用すると最終圧延速度200 m/minにおいてもまだ焼付きが発生せず、圧延が可能となることがわかる。

この結果は、タンデムミルによる高い表面光沢をもったステンレス鋼板を圧延しようとするれば、従来のZミル用の圧延油Aでは圧延速度が100 m/min以上では圧延できないこと、高潤滑性の圧延油Bを用いても200 m/min程度の圧延しかできないことを示している。このことは、タンデムミルにより高い表面光沢をもったステンレス鋼板の圧延に

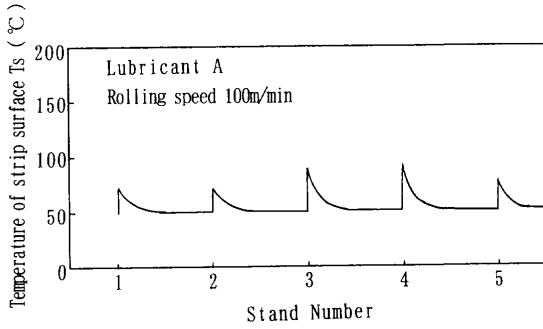


Fig. 7. Temperature change of strip surface in tandem mill at rolling speed of 100 m/min with lubricant A.

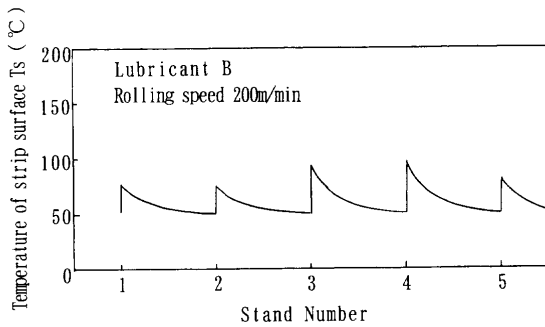


Fig. 8. Temperature change of strip surface in tandem mill at rolling speed of 200 m/min with lubricant B.

において高い生産性を現状において求めることは難しく、新しいトライボロジー技術の開発が必要であることが提言される。

6. 結言

潤滑性評価試験機を用いてステンレス鋼板冷間圧延における耐焼付き性の評価方法を確立し、ステンレス鋼用市販

圧延油をタンデムミルに適用するためのトライボロジー設計を耐焼付き性評価システムにより行い、次の結果を得た。

(1) ステンレス鋼板は普通鋼板に比べ非常に焼付き易く、潤滑性評価試験機による耐焼付き性評価のための減速比を1/10から4/10にした。

(2) 耐焼付き性の評価システムから圧延油AおよびBの焼付き限界界面温度を求め、通常圧延における焼付き限界圧下率を推定した。この推定圧下率は、通常圧延実機において焼付いた圧下率と良く一致した。

(3) この評価結果から高い表面光沢を維持することを目的とした高潤滑性エマルジョン圧延油をタンデムミルに使用した場合、現状においては最高圧延速度が200 m/minであることが推定できた。

おわりに、試験油を御提供頂いた大同化学工業(株)、花王(株)に深く感謝致します。

文 献

- 1) A.Azushima, K.Noro, Y.Iyanagi and H.Degawa: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 576.
- 2) A.Azushima: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 635.
- 3) A.Azushima: 圧延ロールの技術はどこまで進歩したか(What's New in Roll Technologies of the World?), 日本鉄鋼協会基礎研究会圧延ロール研究部会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1995), 36.
- 4) A.Azushima: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 696.
- 5) A.Azushima, Y.Kita, T.Shima and M.Mitsuhashi: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 1978.
- 6) A.Azushima and Y.Kita: *Tetsu-to-Hagané*, **76** (1990), 1270.
- 7) A.Azushima: *J. Jpn. Soc. Technol. Plast.*, **29** (1988), 492.
- 8) 伝熱工学資料, 日本機械学会伝熱工学資料調査分科会編, 日本機械学会, 東京, (1966), 112.
- 9) 中島浩衛, 井浦輝生, 浜渦修一, 井上直温, 吉野英樹: 昭和48年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1973), 41.