

© 1990 ISIJ

論 文

新たに開発した冷間圧延油の実機使用のための評価システム

小豆島 明*・喜多 良彦*²

Evaluating System for Using the Newly Developed Oil in Actual Cold Mill

Akira AZUSHIMA and Yoshihiko KITA

Synopsis :

A system for evaluating the lubricity of newly developed rolling oil is constructed when it is used in an actual cold rolling mill. In the system, the evaluation is carried out as follows; (1) Coefficients of friction and limitation lines of conventional oil and developed oil are measured by means of the simulation testing machine. (2) The interfacial temperature rises due to friction between roll and workpiece of the two oils are calculated. (3) The pass schedule in the actual mill is examined. (4) The interfacial temperature rise at the stand in which the friction pick up occurred is calculated from the data examined. (5) When the developed oil is used in the actual mill, the interfacial temperature rise at the same stand is calculated. (6) From these results, the maximum rolling speed in the actual mill is calculated when the developed oil is used.

By means of this evaluating system, the maximum rolling speed when the newly developed oil was used in the actual mill increased by 200 m/min compared with that of the conventional oil. It is seen that the evaluating system is effective to develop the new oil.

Key words : cold rolling ; rolling oil ; evaluating system ; coefficient of friction ; friction pick up ; interfacial temperature ; maximum rolling speed.

1. 緒 言

最近、生産量が増加している高張力鋼板の冷間圧延の圧延速度は、焼付発生を抑えるため普通鋼板に比べてかなり低く抑えられている。その圧延において、生産性向上の観点から圧延速度を高くするためには、更に潤滑性及び耐焼付性に優れたミルクリーン圧延油を新たに開発しなければならない。しかし、そのような新しい圧延油の開発には現在においても試行錯誤的な方法が用いられており¹⁾、系統だったデータベースに基づく潤滑油設計が行われていない。そのため、前報²⁾においては著者の一人が開発した潤滑性評価試験機³⁾を用いて鉱油ベース圧延油の潤滑性及び耐焼付性のデータを系統的に収集し、それから得た知見をもとにして現行油に代わる新しい高潤滑性ミルクリーン圧延油(新油)を設計しうる可能性を示した。

本研究においては、これら得られた知見を基にして新油を設計し、その新油の潤滑性及び耐焼付性の評価を潤

滑性評価試験機を用いることにより行った。そして、その優劣の評価のみならず実機に新油を使用したときに現行油に比較して、どれだけの生産性の向上が得られるかについて、定量的な評価を与えることが可能なシステムを提案したので報告する。

2. 評価システムの検討のために新しく設計した圧延油

前報²⁾よりミルクリーン圧延油として高潤滑性を得るためには高ケン化価が必要であり、ミルクリーン性を維持するためには牛脂に代わり合成エステル、特にトリエステルが有効であるという知見が得られた。その知見を考慮して、現行油の鉱油 55%、牛脂 30% 及び合成エステル(モノエステル) 10% の組成に比較して、ミルクリーン性を維持して潤滑性を向上させるために、新油では鉱油を 35% に減らし、牛脂を使用しないで合成エステル(トリエステル)を 50% も使用する設計とした。添加剤としては、ミルクリーン性を低下しないようにす

昭和 61 年 10 月本会講演大会にて発表 平成元年 9 月 4 日受付 (Received Sep. 4, 1989)

* 横浜国立大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240)

*² 大同化学工業(株)技術研究所 (Technical Research Laboratory, Daido Chemical Industry Co., Ltd.)

Table 1. Compositions of conventional oil (A) and developed oil (B).

| Compositions (%) | Conventional oil A | Developed oil B |
|------------------|--------------------|-----------------|
| Tallow | 30 | — |
| Wax oxide | — | 10 |
| Mono-ester | 10 | — |
| Tri-ester A | — | 40 |
| Tri-ester B | — | 10 |
| Mineral oil | 55 | 35 |
| MC improver | 3.5 | 2.0 |
| Oiliness agent | 3.0 | — |
| EP agent | 1.0 | 1.0 |
| VI improver | 2.0 | — |
| Emulsifier | 1.5 | 1.5 |

Table 2. Properties of conventional oil (A) and developed oil (B).

| Properties | Conventional oil A | Developed oil B |
|--------------------------------|--------------------|-----------------|
| Viscosity (cSt@40C) | 18 | 24 |
| Acid Value (mgKOH/g) | 12 | 5 |
| Saponification value (mgKOH/g) | 86 | 112 |

るために、新油では現行油で添加されている油性向上剤を削除することにした。これによる潤滑性の低下は、トリエステルを 50% 加えたこと及び石油酸化物を 10% 加えることにより十分に解消しうると判断した。合成エステルの増量による S 分の不足は、S 化合物を 1.5% 添加することで補うこととした。それぞれの現行油 (A 油) と新油 (B 油) の組成及び添加剤を Table 1 に示す。

つづいて、現行油及び新油の性状を Table 2 に示す。新油では現行油に比べ、ケン化価が 110 以上必要である条件を満足し、112 の値が得られた。そのため、新油は現行油に比べて粘度が高くなったが、その他の性状には大きな変化はなかった。

3. 現行油及び新油の評価実験

3.1 実験方法

現行油及び新油の潤滑性及び耐焼付性の評価には潤滑性評価試験機³⁾を用いた。使用した供試材は、板厚 0.4 mm のアルミキルド低炭素鋼焼なまし調質材に 25% の圧延加工を施した板厚 0.3 mm、幅 15 mm のコイル材であった。

潤滑性の評価実験では、上ロール速度を 60, 90, 120, 150 及び 180 m/min とし、圧下率 5% と一定にして圧延を行った。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 ³⁾ を

$$\mu = \frac{T}{P} + \alpha$$

ここで、 α はかみ込み角で求め、現行油と新油の潤滑性を比較した。圧延油は共

に、50°C の 3% エマルションを作製し、毎分 1 l で上ロールとコイル間にノズル噴射した。

耐焼付性の評価実験では、上ロール速度を 60, 90, 120, 150 及び 180 m/min と一定にし、焼付きが発生するまで段階的に圧下率を増加して圧延を行った。焼付きの発生は、上ロール及びコイル表面の目視観察と後方張力の変化から判定した⁴⁾。そして、圧下率と圧延速度との関係図の中で、焼付きの無い領域と焼付きが発生した領域の境界を示す焼付限界線を求め、現行油と新油で耐焼付性を比較した。圧延油は、前に述べた潤滑性の評価実験のときと同じ条件で用いた。潤滑性評価試験機の詳細については前報³⁾で報告したのでここでは省略する。

ミルクリー性 (MC 性) の評価には、圧延-焼なまし試験を用いた。その試験は、板厚 1.6 mm、幅 80 mm 及び長さ 100 mm の SPHC 板を試験片として用いて、2% エマルション圧延油で 8 パス圧延後、エマルションあるいは温水で 1 パス圧延し水切り後、130°C 焼付きを行う。その後、 $N_2 + H_2$ 雰囲気中で 600°C あるいは 680°C で 5 h の焼なましを行い、試験片表面汚れをセロテープにより剝離し、白表紙に添付して明度を測定した。

3.2 実験結果

Fig. 1 に潤滑性評価試験機により得られた現行油及び新油の摩擦係数とロール速度との関係を示す。新油 (B 油) の方が現行油 (A 油) に比べ摩擦係数は各ロール速度とも低く、その差はロール速度との増加とともにわずかに大きくなっている。前報⁴⁾より潤滑性評価試験機で得られた摩擦係数とロール速度の関係は、ほぼ実機における摩擦係数とロールと材料界面での平均相対すべり速

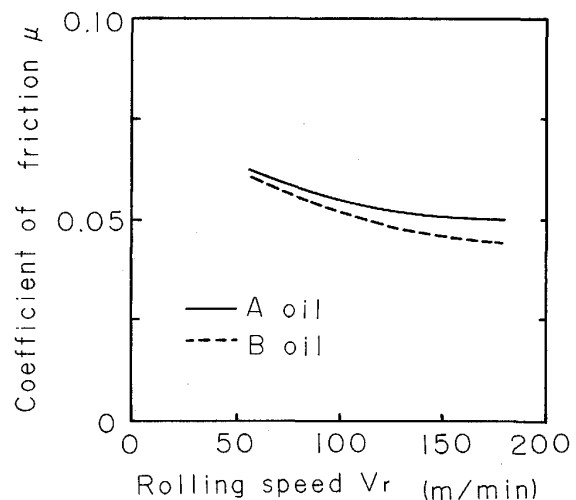


Fig. 1. Relationships between coefficient of friction and roll speed of conventional oil (A) and developed oil (B) obtained by the simulation testing machine.

度の関係を与えることがわかっているの、実機の圧延速度に対応する潤滑性評価試験機のロール速度での新油の摩擦係数は、現行油に比べ約 0.003 低い値が得られることがわかった。

Fig. 2 に現行油 (A 油) と新油 (B 油) の焼付限界線の比較を示す。新油の方が現行油に比べ焼付限界線は、各ロール速度とも圧下率約 2% ほど高くなっている。実機の圧延速度に対応するロール速度での新油の焼付圧下率は現行油に比べ約 2% 高くなっていることがわかった。これらの潤滑性評価試験機の結果から、新油は現行油に比べ潤滑性及び耐焼付性ともに優れていることがわかった。

Table 3 に現行油と新油のミルクリーンの試験結果を示す。新油の MC 性は、エマルジョン圧延において現行油と同等であり、温水圧延においては若干良好な結果が得られた。これらの結果から、新油は現行油以上の高ミルクリーンを維持していることがわかった。

以上の結果から、現行油に代わって新油を実機に使用しても良い結果が得られる可能性のあることがわかった。しかし、実機に新油を使用しようと判断するに当たって、どの程度定量的に良い結果が得られるのかという情

報を得ることが大切である。

4. 実機使用のための評価システム

高張力鋼板などの冷間圧延において、実機に新油を使用するに当たり最も知りたい情報は、焼付発生から設定されている現行油の限界圧延速度を、新油を使用することにより定量的にどの程度高くすることが可能なのかという点であろう。この点を評価するために、前報⁴⁾の耐焼付性に関する研究より得られた結果から、評価圧延油が潤滑性評価試験機のロール速度と実機のロールと材料間の平均相対すべり速度がほぼ同じ値で使用されれば、両機とも焼付きは平均界面温度がある同一温度に達したときに発生するという考え方を導入した。

Fig. 3 に実機に新油を用いたときの焼付限界圧延速度を評価するシステムの流れ図を示す。その評価システムの内容は、以下のとおりである。

(1) 潤滑性評価試験機により現行油と新油の摩擦係数とロール速度の関係のデータ及び焼付限界線のデータを調べる。

(2) 実機の圧延速度の範囲に対応する潤滑性評価試験機のロール速度における現行油と新油の焼付摩擦面温度 T_1 と T_2 を計算する。

(3) 現行油を実機で使用している際に焼付きを発生したときの各スタンドでの圧延速度、圧延圧力、板厚、ワークロール径、張力などのデータを調べる。

(4) 実機で焼き付いたスタンドでの摩擦面温度 T_3 を計算する。

(5) 新油を実機に使用した場合、同じスタンドで焼付きを発生する摩擦面温度 T_4 は、

$$T_4 = T_3 + (T_2 - T_1) \dots \dots \dots (1)$$

で与えられるものとする。

(6) そのスタンドで圧延速度以外の条件が同じであるとして、摩擦面温度 T_4 に対応する圧延速度を逆算する。その逆算された圧延速度に対応する最終スタンドでの圧延速度が、新油を実機に使用したときの限界圧延速度となる。

ここで、評価システムにおいて最も大切な潤滑性評価試験機及び実機のロールと材料間界面における摩擦面温度の計算には、Archard モデル⁵⁾を発展させた方法⁶⁾を用いた。この方法の概要を以下に説明する。Fig. 4 に潤滑性評価試験機及び実機のロールと材料との接触部分の模式図を示す。幅 2l の帯形の接触とし、ロールと材料の添え字を r, w とする。ロール及び材料の熱伝導率、比熱、密度、温度伝導率をそれぞれ $K_r, K_w; C_r, C_w; \rho_r, \rho_w; \alpha_r, \alpha_w$ とする。また、ロールの速度を V_r 、材料の入口、

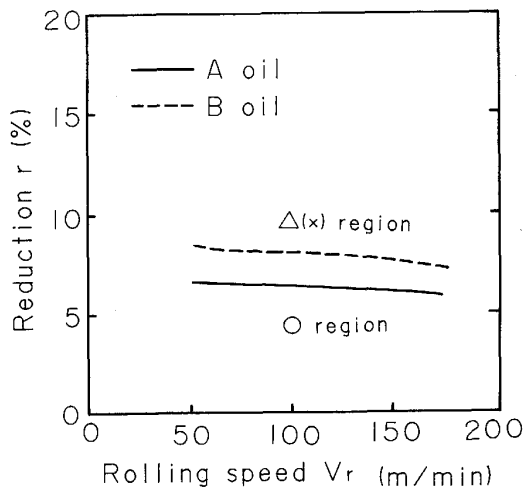


Fig. 2. Limitation lines of friction pick up of conventional oil (A) and developed oil (B) obtained by the simulation testing machine.

Table 3. Cleanliness after annealing.

| Test methods | Conventional oil A | | Developed oil B | |
|--------------------------------------|--------------------|---------------|-----------------|---------------|
| | Oil rolling | Water rolling | Oil rolling | Water rolling |
| Cleanliness after annealing at 600°C | 43.0 | 38.5 | 44.7 | 43.2 |
| Cleanliness after annealing at 680°C | 51.0 | 44.3 | 50.3 | 49.6 |

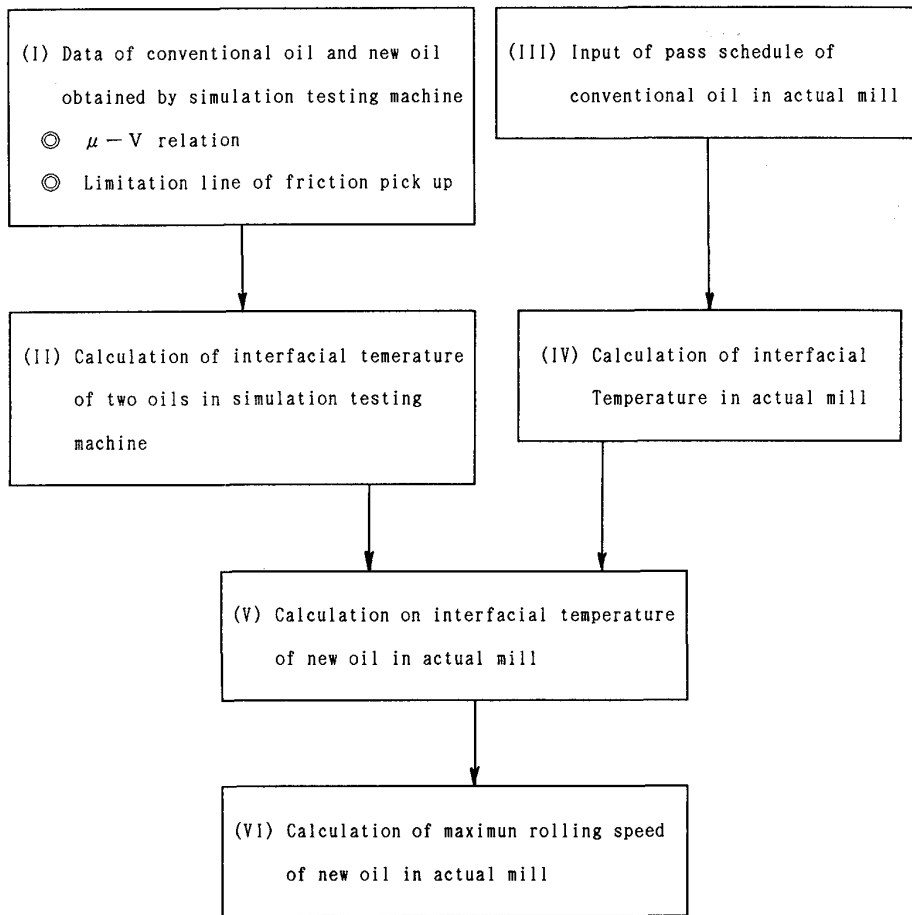


Fig. 3. Flow chart of estimation system for calculating the maximum rolling speed when the developed oil (B) is used in actual mill.

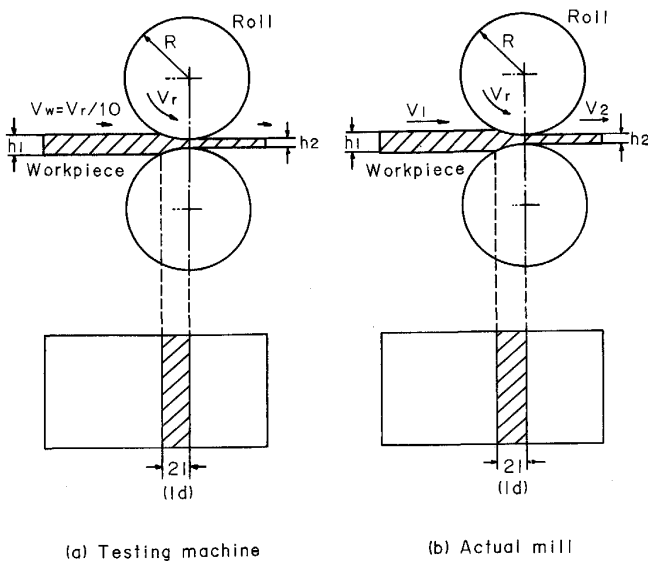


Fig. 4. Schematic representations of the contact zone in rolling of simulation testing machine (a) and actual mill (b).

出口速度を V_1 , V_2 及びその平均速度を V_w とし、接触領域での面圧を p_m とする。

潤滑性評価試験機の接触面において、摩擦により毎秒単位面積当たり q の熱量が発生するものとし、材料はほぼ固定状態 ($V_w \doteq 0$) と仮定し、熱伝導が定常状態に達していると考え、ロールと材料の界面での平均温度上昇 T_m は

$$T_m = 4l \cdot q \cdot \frac{1}{4.24K_w + 3.76 \left(\frac{V_r \cdot l}{\kappa_r} \right)^{1/2}} \dots \dots \dots (2)$$

で与えられる。ここで、摩擦面に発生する単位時間単位面積当たりの熱量 q は

$$q = \mu \cdot p_m \cdot V_r \dots \dots \dots (3)$$

で与えられるので、(2)式は

$$T_m = 4 \cdot l \cdot \mu \cdot p_m \cdot V_r \cdot \frac{1}{4.24K_w + 3.76K_r \left(\frac{V_r \cdot l}{\kappa_r} \right)^{1/2}} \dots \dots (4)$$

となる。ここで、 μ は摩擦係数である。

実機においても、同じく摩擦により毎秒単位面積当たり q の熱量が発生するものとする。このときのロール及

び材料ともかなり大きな速度で移動しており、ともに表面温度は冷却作用を受けることになるので、ロールと材料の界面での平均温度上昇 T_m は

$$T_m = 1.06 \cdot l \cdot q \frac{1}{K_w \cdot \left(\frac{V_w \cdot l}{\kappa_w}\right)^{1/2} + K_r \left(\frac{V_r \cdot l}{\kappa_r}\right)^{1/2}} \dots (5)$$

で与えられる。ここで、 ΔV をロールと材料間界面での平均相対すべり速度とすると、摩擦面に発生する単位面積当たりの熱量は

$$q = \mu \cdot p_m \cdot \Delta V \dots (6)$$

で与えられるので、材料速度の平均値がロール速度に等しい ($V_w \doteq V_r$) とすると、(5)式は

$$T_m = 1.06 \frac{l \cdot \mu \cdot P_m \cdot \Delta V}{(V_r \cdot l)^{1/2}} \cdot \frac{1}{\frac{K_w}{\kappa_w^{1/2}} + \frac{K_r}{\kappa_r^{1/2}}} \dots (7)$$

で与えられる。ここでは、材料の加工熱の影響は無視している。

いま、潤滑性評価試験機における(2)式の摩擦によるロールと材料界面での平均温度上昇 T_m 及び実機における(7)式の平均温度上昇 T_m の計算結果を Fig. 5 及び Fig. 6 に示す。ロール及び材料とも材質は鋼であるので、熱伝導率 $K_r = K_w = 42 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、密度 $\rho_r = \rho_w = 7800 \text{ kg/m}^3$ 、比熱 $C_r = C_w = 0.42 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ 、温度伝導率 $\kappa_r = K_r / \rho_r \cdot C_r$ 及び $\kappa_w = K_w / \rho_w \cdot C_w$ とし、ともに平均面圧 $p_m = 500 \text{ MPa}$ 、摩擦係数 $\mu = 0.05$ とした。縦軸が平均温度上昇 T_m 、横軸がロール速度 V_r である。Fig. 5 の潤滑性評価試験機においては接触弧長 $ld (= 2l)$ を 0.5, 1.0, 2.0 及び 4.0 mm の場合、及び Fig. 6 の実機においては圧下率を $r = 0.4$ とし、ロール速度と材料の出口速度がほぼ等しいとして、一方、平均相対すべり速

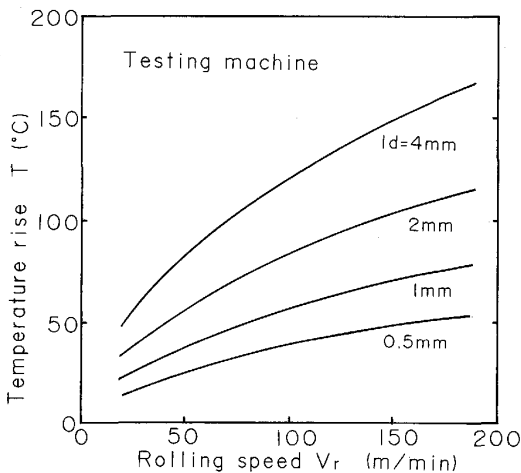


Fig. 5. Temperature rise for roll speed at various contact arc lengths calculated by eqn. (2) in simulation testing machine.

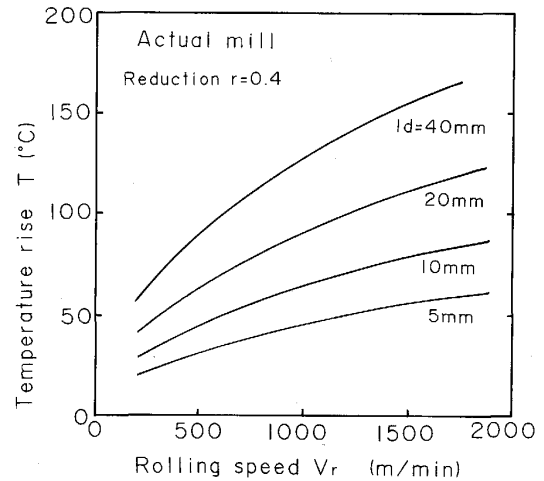


Fig. 6. Temperature rise for rolling speed at various arc contact length calculated eqn. (7) in actual mill.

度 ΔV を

$$\Delta V = \frac{r}{2} V_r \dots (8)$$

と仮定して、接触弧長を 5.0, 10, 20 及び 40 mm の場合についてそれぞれ計算した。

Fig. 5 の潤滑性評価試験機及び Fig. 6 の実機におけるロールと材料界面の平均温度上昇は、ともにロール速度あるいは接触弧長の増加とともに大きくなっている。Fig. 5 の潤滑性評価試験機の圧延条件としては、ロール直径が 76 mm で一定であるため、板厚を 0.5 mm とすると圧下率が 0.03 から 0.2 の範囲にあるので、接触弧長としては 0.7 から 2.0 mm の値が考えられ、評価試験機のロール速度範囲においては、Fig. 5 に示す平均温度上昇が計算される。一方、実機の圧延条件としては、入口板厚が 0.5 から 4.0 mm、ワークロール径が 300 から 600 mm の範囲にあるので、圧下率を 0.4 とすると、接触弧長としては 5.5 から 22 mm の値が考えられ、実機の圧延速度範囲においては Fig. 6 に示す平均温度上昇が計算される。

潤滑性評価試験機において Fig. 6 と同等の平均温度上昇を与える条件としては、(3)式と(6)式の摩擦面に発生する単位面積当たりの熱量 q を同じ条件にする必要がある。その結果から、実機における平均すべり速度 ΔV と潤滑性評価試験機におけるロール速度 V_r を同じ値と仮定すると、潤滑性評価試験機における接触弧長は Fig. 5 に示すように実機の接触弧長の 1/10 から 1/20 と非常に短かくて良いことになる。具体的には、本試験機のロール径が 76 mm であるので、板厚 0.4 mm の試験コイルを用いると圧下率が 0.05 から 0.15 とかなり低い値で実機

と同等の摩擦による平均温度上昇が得られることが理解できる。

この計算結果は、Fig. 2 の潤滑性評価試験機の現行油と新油の焼付限界の圧下率が 0.10 から 0.05 とかなり低い値であったことを説明できる。

5. 評価システムによる新油の評価

評価システムの順番に沿って Table 1 に示した新たに設計した新油の評価を行う。

(1)の潤滑性評価試験機による現行油と新油の摩擦係数とロール速度の関係及び焼付限界曲線は Fig. 1 及び Fig. 2 に示されている。

(2)の現行油と新油の潤滑性評価試験機におけるロールと材料間の摩擦面での温度上昇 T_1 及び T_2 は(2)式に(1)で得られた実験データを用いて計算した。計算した温度上昇とロール速度との関係を Fig. 7 に示す。現行油、新油とも摩擦面温度は、ロール速度とともに大きくなるが、ロール速度 120 m/min 以上ではゆるやかな上昇になっている。新油の温度上昇の方が現行油に比べてすべてのロール速度で高くなっている。実機の圧延速度領域に対応するロール速度領域 (120 m/min 近傍) での温度上昇 T_1 及び T_2 の値として、 $T_1 = 75^\circ\text{C}$ 、 $T_2 = 78^\circ\text{C}$ が得られる。

(3)実機で現行油を用いて高張力鋼板を冷間圧延した際、焼付きを発生したときのデータとしては、5 スタンドのタンデムミルで初期板厚 3.0 mm を 0.8 mm まで圧延するスケジュールを考え、ワークロール径、圧下率、面圧、圧延速度のデータを Table 4 のように仮定した。この際、焼付きは No. 4 スタンド目で発生したものとす

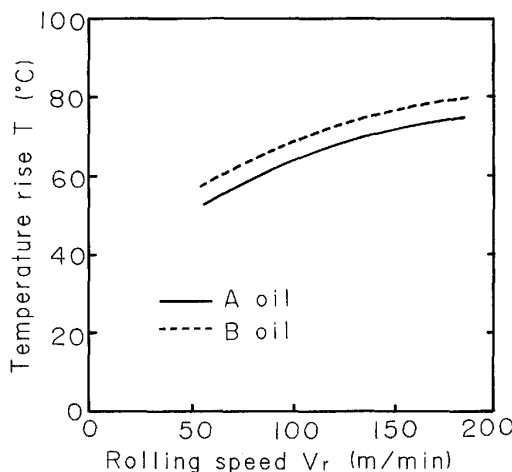


Fig. 7. Temperature rise for roll speed of conventional oil (A) and developed oil (B) in simulation testing machine.

Table 4. Pass schedule of high strength steel in actual mill.

| STD | Roll diameter (mm ϕ) | Exit thickness (mm) | Reduction (%) | Mean pressure (kgf/mm 2) | Rolling speed (m/min) |
|-------|----------------------------|---------------------|---------------|------------------------------|-----------------------|
| No. 1 | 600 | 2.4 | 20 | 80 | 350 |
| No. 2 | 600 | 1.8 | 25 | 90 | 500 |
| No. 3 | 650 | 1.25 | 30 | 100 | 700 |
| No. 4 | 650 | 0.9 | 30 | 110 | 900 |
| No. 5 | 650 | 0.8 | 10 | 115 | 1 000 |

る。

(4)No. 4 スタンドで焼付きを発生したときの摩擦面温度上昇 T_3 は(7)式から計算した。摩擦係数 μ を 0.05 とし、Table 4 より $p_m = 110 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $V_r = 900 \text{ m/min}$ 、 $r = 0.3$ 、 $\Delta V = \frac{r}{2} \cdot V_r = 135 \text{ m/min}$ 、 $ld = \sqrt{R \cdot \Delta h} = 10.7 \text{ mm}$ を用いて、 $T_3 = 95.3^\circ\text{C}$ が得られる。

(5)新油を使用した場合、同じスタンドで焼付きを発生する温度 T_4 は

$$T_4 = T_3 + (T_2 - T_1) = 98.3$$

となる。

(6)この T_4 値及び新油の摩擦係数として潤滑性評価試験機の結果から現行油に対して 0.003 低い 0.047 並びに他の条件を同じにして、(7)式に代入して No. 4 スタンドでの圧延速度を求めると

$$V_r^4 = 1 100 \text{ m/min}$$

が得られ、最終スタンドでの限界圧延速度が 1 190 m/min となる。

これらの結果から、新油を使用することにより従来よりも圧延速度を 200 m/min 高くすることが可能となり、生産性を大きく向上することができることが予想される。この評価システムは、焼付きを発生したスタンドでのロール-材料間界面の摩擦面温度を考慮しただけの原理的な段階ではあるが、今後各スタンドでのデータを考慮することや、圧下配分などを変更することにより限界圧延速度を更に高くすることが可能となろう。

最後に、この評価システムを利用して、実際の圧延操業ラインにおいて新しい高潤滑ミルクリーン圧延油の開発が行われ⁷⁾、Fig. 8 に示すように新油の平均圧延速度は各サイズともに現行油に比べて、10% の速度向上を成し遂げている結果⁸⁾を示しておく。

6. 結 言

潤滑性及び耐焼付性に優れたミルクリーン圧延油を新たに開発し、潤滑評価試験機によりその性能評価を行い、評価システムにより限界圧延速度を求め、次の結果を得た。

(1)トリエステルを 50% 添加することなどにより、

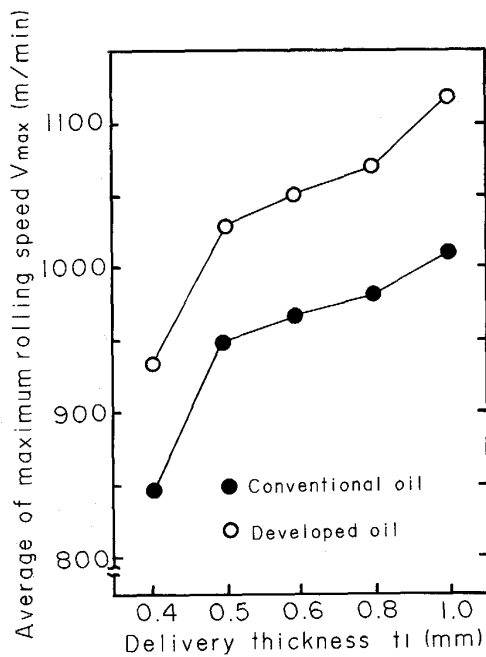


Fig. 8. Comparison between maximum rolling speeds of conventional oil (A) and developed oil (B) at various delivery thicknesses in actual mill.

ケン化価の高い圧延油を試作し、潤滑性評価試験機によりその性能評価を行った結果、現行油に比べ潤滑性及び

耐焼付性に優れていることがわかった。

(2) 潤滑性評価試験機の結果を用いて、実機における限界圧延速度を評価することにより、新油を実機に使用する際の定量的評価が可能となる評価システムを開発した。その評価システムから新しく開発した新油が現行油に比べて、限界圧延速度を 200 m/min 高くできることがわかった。

(3) 実際の圧延操業ラインの新油開発の際、この評価システムが有効なことがわかった。

文 献

- 1) 例えば、伴 誠二, 伊藤重晴, 田中 毅, 井上安充正: 潤滑, **27** (1982), p. 574
- 2) 小豆島明, 喜多良彦, 高石敏充: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 1986
- 3) 小豆島明: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 696
- 4) 小豆島明, 喜多良彦, 志磨貴司, 三橋 勝: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 1978
- 5) J. F. ARCHARD: *Wear*, **2** (1958/59), p. 438
- 6) 小豆島明: 塑性と加工, **29** (1988), p. 492
- 7) 西野隆夫, 伊山彰一, 田中政輔, 岡本隆彦: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1560
- 8) 伊山彰一, 西野隆夫, 岡本隆彦: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1561