

高粘度微細粒径型ステンレス用冷間圧延油の開発

木村 幸雄*・升田 貞和*・八木 竜一*²・三宅 勝*・三原 豊*³・森 郁夫*⁴・山川 雅幸*⁴

Development of an O/W Emulsion with High Viscosity
and Fine Droplet Size in Cold Rolling of Stainless Steels

Yukio KIMURA, Sadakazu MASUDA, Ryuichi YAGI, Masaru MIYAKE, Yutaka MIHARA, Ikuo MORI and Masayuki YAMAKAWA

Synopsis : Due to high productivity of tandem cold rolling mills, it is beneficial to produce not only mild steels but stainless steels by using the process, instead of conventional reverse rolling mills with smaller diameter of work rolls. Requirements to lubricant in order to realize the process are conflicting, which one side oil film thickness is required to be reduced to provide brightness of products, beside too thin film causes seizure and heat stretch.

In this study, an O/W emulsion is designed and developed to contend with these conflicting requirements. In order to make oil film thickness at inlet zone of roll bite be thinner, the droplet size is reduced down to about $1\mu\text{m}$. Also, kinematic viscosity of base oil is increased up to $320\text{mm}^2/\text{s}$, which makes the film stronger and prevent heat stretch, even if the film thickness is reduced. Through laboratory tests and cold rolling tests using a production mill, the superiority of this type of lubricant is clarified and good surface brightness of SUS430 can be obtained with large diameter of work rolls in high speed rolling conditions.

Key words : cold rolling ; lubricant ; emulsion ; surface glossiness ; heat stretch ; viscosity ; oil droplet size ; stainless steel.

1. 緒言

普通鋼板の冷間圧延工程では、比較的大径のワークロールを備えたタンデムミルによる高速圧延が行われており、近年酸洗工程との連続化技術の開発などによって、大幅な生産能率の向上が図られてきた。これに伴って、小径レバースミルを用いた低速圧延によって製造されていた鋼種についても、タンデムミルを利用した製造が行われてきている。さらに、ステンレス鋼板に代表されるような表面光沢が重視される鋼種についても、タンデムミルの利用が試みられている¹⁾。

通常、ステンレス鋼板の冷間圧延には、小径のワークロールを有するクラスタータイプの圧延機が用いられ、駆動ロールのスリップを防止する目的から、比較的摩擦係数の高い低粘度鉱物油が圧延油として用いられている。このような圧延条件はロールバイトへ導入される油量を抑制する効果が高く、高い表面光沢度を得やすいという特長がある²⁻⁴⁾。ただし、ストレートタイプの圧延油であることから、引火性が高く、低速度での圧延を余儀なくされるといった欠点がある。

一方、大径ロールを用いた高速圧延によって高生産性を実現するタンデムミルでは、良好な潤滑性を有する天然油

脂や合成エステル油を低濃度のO/Wエマルションとして用いることで、優れた冷却性を確保し、ヒートスクラッチの発生を防止している。このような大径ロールによる高速圧延は、高い表面光沢度を得る上で、小径ミルに比べて不利な条件となっている⁵⁾。したがって、タンデムミルを利用してステンレス鋼板の冷間圧延を行う際に重要となるのは、その特徴である高生産性を有すると同時に、高い表面光沢度を得るといった相反する特性を、いかに両立させるかという点である。

本研究では、タンデムミルによるステンレス鋼板の冷間圧延を実現させることを目的として、大径ロールによる圧延条件下であっても高表面光沢度を得ると共に、高速圧延においてヒートスクラッチの発生を防止することを可能とする圧延油の開発を行った。

2. 圧延油設計の考え方

2・1 エマルション粒径の微細化効果

冷間圧延における鋼板の表面性状に関しては、小豆島らによる一連の研究⁶⁾を始めとして、従来から多数なされており、ロールバイト入口における油膜厚みが圧延後の表面光沢度を強く支配し、光沢度を向上させるためには油膜厚

平成9年7月24日受付 平成9年11月17日受理 (Received on July 24, 1997; Accepted on Nov. 17, 1997)

* NKK総合材料技術研究所 (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., 1 Kokan-cho Fukuyama 721)

* 2 NKK総合材料技術研究所 (現: テクノリサーチ研究所) (Materials & Processing Research Center, NKK Corp., now Techno Research Institute, Inc.)

* 3 NKK技術企画部 (Planning and Coordination Dept., NKK Corp.)

* 4 日本クエーカー・ケミカル (Nippon Quaker Chemical)

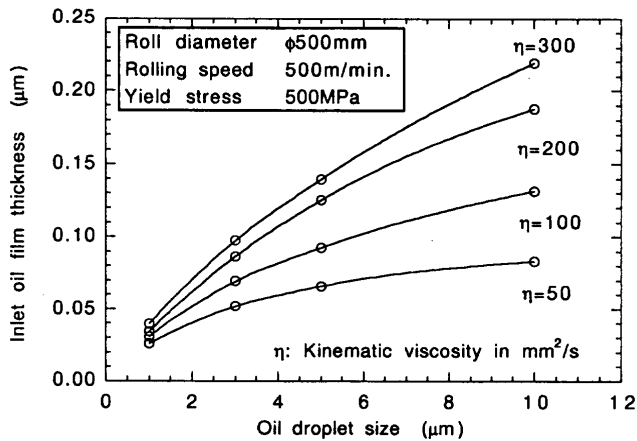


Fig. 1. Calculation of inlet oil film thickness of emulsions.

みの低減が有効である。すなわち、混合潤滑状態にあるロールバイト中では、油膜が薄いほどロールと鋼板との接触率が高くなり、ロールの表面状態が鋼板表面に転写されやすくなる。逆に、油膜が厚い場合には、界面にトラップされた圧延油によって、多数のオイルピットが発生し、鋼板の表面光沢を低下させる。

一般に、タンデムミルでは冷却性に優れたO/Wエマルションが使用されており、ロールバイトへ導入される油膜厚みに関しては、小豆島ら^{7,8)}が提案したモデルを用いた解析が可能である。このモデルからは、油膜厚みを低減するための圧延油として、ベース油の粘度、エマルション粒径および濃度を低下させること、さらにエマルション粒子のトラップ率を低下させることが有効であるとされている。ここでは、ベース油の粘度とエマルション粒径の影響に着目し、このモデルを用いた計算結果をFig. 1に示している。ただし、これは圧延油の温度が一定と仮定した場合の計算結果である。図から分かるように、ベース油の粘度が低く、エマルション粒径が小さいほど入口油膜厚みが低減しており、粒径を微細化した場合には粘度の影響が小さくなることが予測される。

2・2 ベース油の高粘度化

冷間圧延におけるヒートスクラッチの発生については、木村らによる一連の研究^{9,10)}で、鋼板の最高温度に関連する境界潤滑膜の破断をトリガーとすることが示されている。一般にタンデム圧延時の鋼板は、加工発熱と摩擦発熱による温度上昇と、ロールとの接触、スタンド間での冷却による温度降下を繰り返し、室温から200°C程度まで温度が上昇する。また、ロールバイト入口から出口にかけて約100°C程度の温度変化がみられるスタンドもある¹¹⁾。したがって、こうした広い温度領域にわたって、良好な潤滑性と油膜強度を保持しなければ、バイト中の局所的な温度上昇によって、境界潤滑膜の破断が十分起こり得ると考えられる。

通常、このような温度範囲における油膜強度を確保する目的から、ベース油に対して油性剤や極圧剤が添加されて

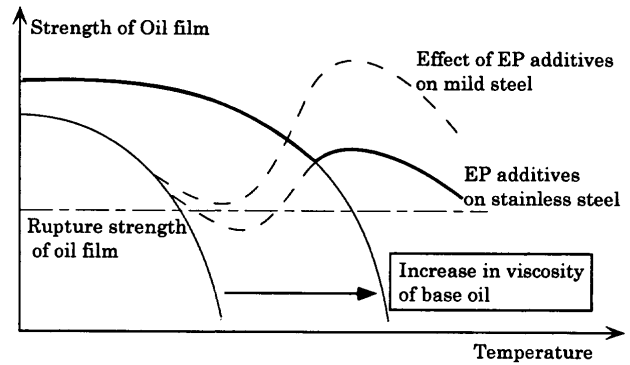


Fig. 2. Schematic representation of the effects of viscosity and EP additives on film strength.

いる。ところが、普通鋼のヒートスクラッチ防止に有効な極圧添加剤であっても、クロム系ステンレス鋼に対しては効果が小さいものもあり¹²⁾、実際には添加剤のみでは十分にヒートスクラッチを防止できない場合が多い。したがって、ステンレス鋼に対して極圧剤が効果を発揮する温度域に到達するまでの領域で、ベース油自身の油膜強度を上昇させることが必要であると考えられる。この考え方をFig. 2に概念図として示しており、より広い温度範囲に対して油膜強度を確保する目的から、適切な添加剤の使用と併せて、ベース油の高粘度化を図ることで、ヒートスクラッチを防止するという考え方をとるものとする。

2・3 高粘度微細粒径エマルション油の考え方

以上から、高表面光沢を実現して、かつヒートスクラッチの発生を防止することが可能な圧延油の設計に対しては、適切な添加剤の選択と共にベース油の高粘度化を図ることで耐ヒートスクラッチ性を向上させ、高表面光沢を得る目的からはエマルション粒径の微細化によって導入油量を低減させることが有効であると予測される。本圧延油は、このような考え方に基づいて設計したものであり、高粘度微細粒径エマルションと呼ぶ。ちなみに、ベース油を高粘度化してもエマルション粒径の微細化によって、十分導入油量を低減させ得ることはFig. 1に示されており、ベース油粘度の影響が十分小さくなるまで、エマルション粒径の微細化を図ることが重要である。

3. 高粘度微細粒径型圧延油の試作

3・1 ベースオイルの選択

油膜破断によるヒートスクラッチを防止するために、ベースオイルとして油性の高いポリオールエステルを選択した。用いたポリオールエステルは、ネオペンチルポリオールと高級脂肪酸から合成され、各々の種類を変更させることによって粘度を変化させることが可能である。具体的には、ペンタエリスリトール混合脂肪酸エステル、トリメチロールプロパン脂肪酸エステルとネオペンチルグリコールジオレートを単品または混合させたものを使用した。

3・2 添加剤の選定

ロールバイト中の高温、高圧下での油膜強度を補い、クロム系ステンレスのように特に焼付きが発生し易い鋼種に対しても、効果を有すると考えられる添加剤を選定した。油性向上剤としては高級脂肪酸やダイマー酸を使用した。極圧添加剤としては、ハロゲン系の極圧添加剤では十分な効果が得られず、また普通鋼の耐ヒートスクラッチに有効なものでもクロム系ステンレス鋼には効果がない事例もあることから、有機リン系の極圧添加剤を使用した¹³⁾。

3・3 界面活性剤の選定

循環式クーラントシステムを採用しているタンデムミルにおいては、初期乳化だけでなく長期にわたって微細粒径を維持する必要がある。そこで数種類の乳化系を用いた安定性の評価試験を行った。Table 1 に供試油を示す。供試油 1 はイオン系の界面活性剤を用いたものであり、供試油 2, 3 は目標粒径をそれぞれ1.5, 2.5 μm として複数の非イオン系界面活性剤をベースとしてオリゴマーの非イオン系界面活性剤を併用した乳化系を用いた。さらに供試油 4 は供試油 3 からオリゴマーの非イオン系界面活性剤を除いたものである。試験方法としては、500mlビーカーに50 $^{\circ}\text{C}$ に加熱した291mlのイオン水と9 mlの供試油を入れ、特殊機械工業社製ホモキサーTK-II型を用いて10000rpmにて30分間攪拌を行った。その際、比較として攪拌開始後に200 \AA の超微細鉄粉を加える試験を行った。

試験結果をFig. 3 に示す。図から分かるように供試油 1 のようなイオン系の界面活性剤を用いた場合にはエマルジョン粒径を非常に微細に、かつ分布をシャープにすることが可能であるが、攪拌開始直後に粒径の変化が大きい傾向がみられる。非イオン系の界面活性剤を用いた供試油 2, 3 は攪拌時間および鉄粉の有無にかかわらず安定した粒径が、

ほぼ目標値通りに得られていることが分かる。一方で試作油 4 のようにオリゴマーの非イオン系界面活性剤がない場合には、鉄粉の有無によって粒径の変化が生じており、循環式クーラントシステムでは乳化安定性を確保するのが困難となるものと予測される。以上の結果から、界面活性剤としては、上記 1~3 のものを目標とするエマルジョン粒径に応じて使用した。

3・4 試作油の特性

実験および実機テストに供するために、ベース油の粘度とエマルジョン粒径を変えた数種類の圧延油を試作した。試作した圧延油の特性をTable 2 に示す。ベース油の粘度はポリオールエステル混合比によって、粒径については活性剤の種類と混合比を変えることで調整したものであり、

Table 1. Composite of test oils to evaluate emulsifiers.

| | Test Oil 1 | Test Oil 2 | Test Oil 3 | Test Oil 4 |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| PET/TMP ester | 85.4% | 85.9% | 88.9% | 89.9% |
| EP additive (Phosphoric) | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| Oiliness Improver | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 |
| Anti-Oxidant | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| Polyoxyethylene (4mole) Nonyl Phenol | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| Polyoxyethylene (15mole) Nonyl Phenol | - | 2.5 | 1.5 | 1.5 |
| Triethanolamine | 2.0 | - | - | - |
| Polyethylenglycol (600) dioleate | 3.0 | 2.0 | - | - |
| Cocount Fatty Acid Diethanolamide | 1.0 | - | - | - |
| Origomeric Surfactant(Nonionic) | - | 1.0 | 1.0 | - |

PET : Penta-erythritol

TMP : Trimethylol-propane

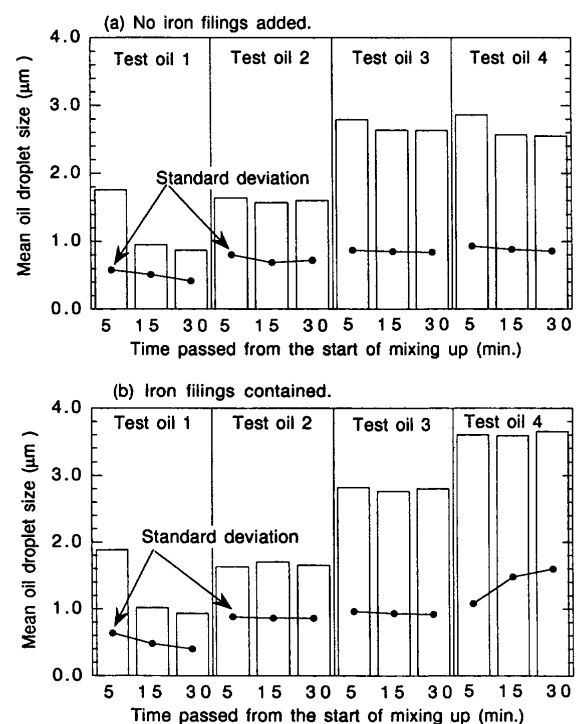


Fig. 3. Stability of test emulsions.

Table 2. Properties of test oils.

| Test Oil | Base oil | Kinematic Viscosity (mm ² /s, @40 $^{\circ}\text{C}$) | Acid Value | Sap. Value | Mean Droplet Size (μm) |
|----------|--------------------|---|------------|------------|------------------------|
| A | PET/TMP ester | 320 | 24 | 162 | 1.1 |
| B | PET/TMP ester | 264 | 24 | 162 | 1.4 |
| C | PET/TMP ester | 264 | 24 | 170 | 2.5 |
| D | PET/TMP ester | 264 | 24 | 172 | 4.6 |
| E | PET/TMP ester | 195 | 25 | 162 | 3.1 |
| F | PET/TMP /NPG ester | 119 | 24 | 160 | 2.0 |
| G | PET/TMP /NPG ester | 119 | 24 | 160 | 2.4 |

NPG : Neopentyl glycol

同量の油性向上剤と極圧添加剤を添加している。

4. 圧延油特性の基礎実験による評価

4.1 実験方法

実験室レベルでの評価として、高速圧延が可能な切板試験圧延機によって表面光沢度を調査した他、高速四球試験とコイルを用いたレバース圧延実験によって耐ヒートスクラッチ性の評価を行った。

表面光沢度を評価するための切板材を用いた高速圧延実験では、表面粗さ $0.04\mu\text{mRa}$ 、 $\phi 500\text{mm}$ のワークロールを用いて、各パス圧下率を10%として、3パス圧延後の表面光沢度を測定した。試験片は市販のSUS430の2B材であり、光沢度として20°GLOSSで750~800のものを用いた。圧延油としては、濃度5 Vol%、温度 55°C にて攪拌し、Table 2に示すエマルジョン粒径を得た。

また、耐ヒートスクラッチ性を評価するために行った高速四球式摩擦試験では、鋼球として $\phi 1/2\text{inch}$ のSUS440Cを用いた。この実験では、初期温度を 50°C として、設定回転数を一定に保持しながら、段階的に荷重を変更し、回転トルクの急激な上昇が生じた時点の荷重を測定した。さらに、コイル圧延実験では市販のSUS430の2B材コイルを用いて、各パス圧下率25%にて5パスのレバース圧延を行い、各パスにおける鋼板およびロール表面の目視によってヒートスクラッチ発生を判定した。使用したワークロールは $\phi 410\text{mm}$ 、表面粗さが $0.06\mu\text{mRa}$ であり、圧延速度を $30\text{m}/\text{min}$ とした。

4.2 実験結果

表面光沢度に関する高速圧延実験の結果をFig. 4に示す。図から分かるように、ベース油の粘度が低いほど表面光沢度は高い傾向にあるものの、粘度が高い場合でもエマルジョン粒径を小さくすることによって、圧延後の表面光沢度を高くすることが可能である。

耐ヒートスクラッチ性に関する高速四球式摩擦試験の結果をFig. 5に示す。図からは、粘度が高いほど耐圧荷重が増加していることが分かる。これは回転速度 3000rpm の条件では多くの場合、試験機の最高荷重であっても焼付きは発生せず、速度が高い場合に耐圧荷重が大きく低下していることから、界面温度の上昇が耐圧荷重に大きな影響を与えており、粘度が高い場合には界面温度が高くても油膜強度を保持することができるものと推測される。ただし、油膜厚みと界面温度の影響を厳密に分離した試験ではないことに注意する必要がある。

一方、コイル圧延実験の結果をTable 3に示す。本コイル圧延機では、圧延速度を実機並に高くすることはできないため、鋼板温度は巻取り後 100°C 程度であり、本試作油では鋼板全面に発生するような焼付きは観察されなかった。そこで、鋼板エッジ部における局所的な焼付き状況に基づ

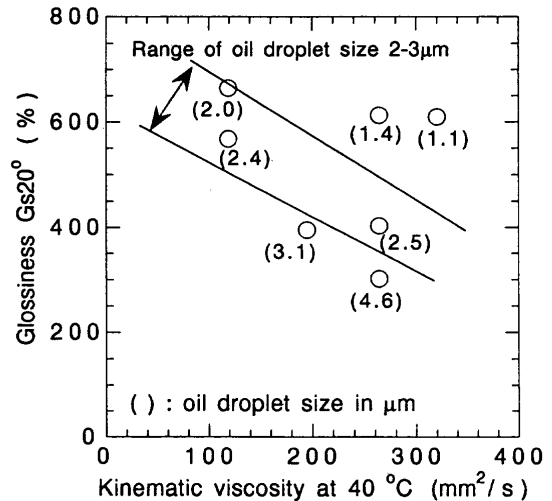


Fig. 4. Dependence of surface glossiness on viscosity and oil droplet size.

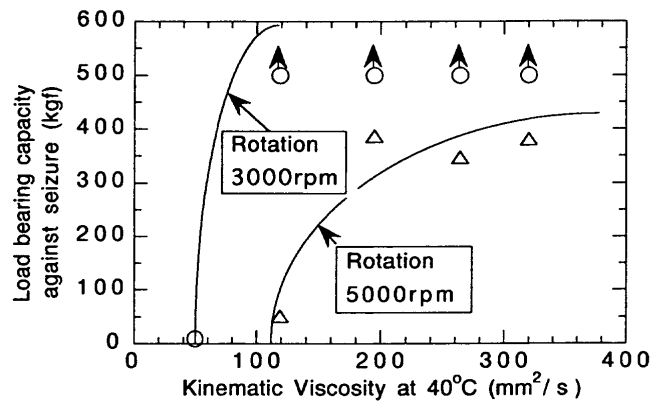


Fig. 5. Load bearing capacity in four-ball tests.

Table 3. Evaluation of heat scratch in coil rolling tests.

| Pass No. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|---|---|---|---|---|
| A | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| B | ○ | △ | △ | △ | △ |
| E | △ | △ | △ | △ | △ |
| F | △ | △ | △ | △ | △ |

○ : No heat scratch observed
 △ : Partially observed along edges
 × : Heat scratch observed on surface

いて判定を行っており、ベース油の粘度が高いほど、エッジ部の焼付きが低減している。

5. 実機タンデムミルによる評価

5.1 実機テスト方法

高粘度微細粒径エマルジョンの効果を、実機にて確認する目的から、Table 2の試作油の中から4種類を選択し、NKK福山製鉄所#1タンデムミルにおいて実機テストを行った。Table 4にテスト条件を示す。

Table 4. Rolling conditions in tandem cold rolling mill.

| | |
|--|---------------------------------|
| Rolling mill / Number of stand | Tandem mill / 5 stand |
| Work roll diameter (mm) | φ 540~575 |
| Test material | SUS430 |
| Thickness of mother / finished strip (mm) | 3.0 / 0.75 |
| Surface roughness of work rolls Ra (μ m) | #1-3STD: 0.5~1.0, #4-5STD: 0.07 |
| Surface roughness of mother strip Ra (μ m) | 0.27 |
| Coolant system | Recirculation |

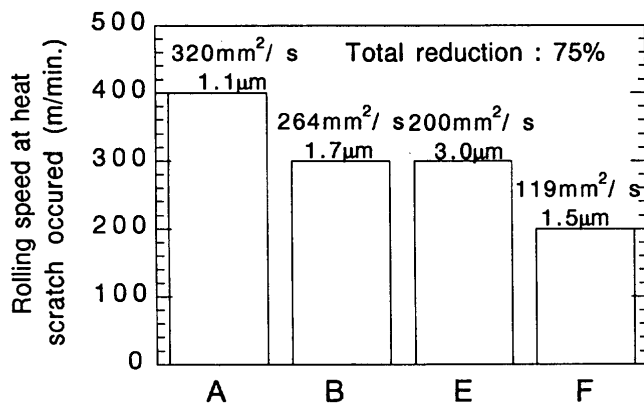


Fig. 6. Limiting rolling speed due to heat scratch.

試験方法は、初期圧延速度150m/minから、400m/minまで段階的に加速と保持を繰返し、ヒートスクラッチが観察されるまで圧延速度を上昇させた。圧延後のコイルは、洗浄工程の入出側にて鋼板サンプルを採取した後、目視にてヒートスクラッチの発生状況を確認した。また試験中の最高速度での表面光沢度を測定した。さらに、洗浄後の鋼板サンプルを焼鈍、酸洗処理した後に、実験室圧延機を用いたスキンパス圧延にて、1~2%の伸長率を無潤滑にて与え、表面光沢度を測定した。ただし、スキンパス圧延では表面粗さ0.05μmRa、ロール径φ500mmの圧延ロールを使用した。

5・2 実機テスト結果

実機テストにおいて、ヒートスクラッチが発生した圧延速度をFig. 6に示す。試験に用いた試作油は、Table 2におけるA, B, E, Fであるが、実機テスト時に実測したエマルジョンの平均粒径は、表中の目標値とは多少異なっていたため、図中には実機テスト時に実測した粒径を付記している。試験結果からは、ベース油の粘度が高いほど耐ヒートスクラッチ性が優れている傾向が確認される。また、本試作油では鋼板表面全体にヒートスクラッチが発生しているものではなく、すべて板エッジ近傍の焼付きであった。

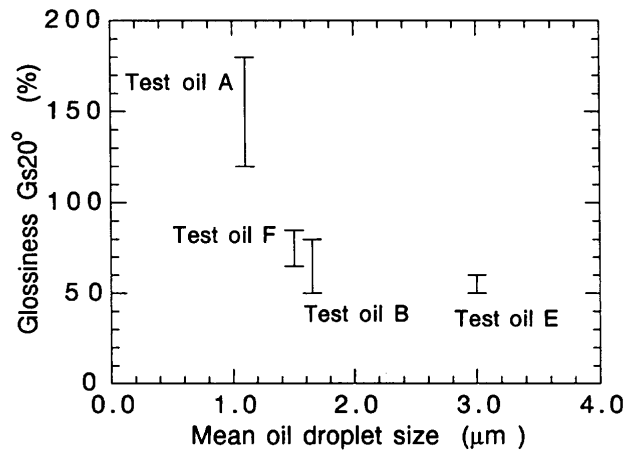


Fig. 7. Surface glossiness of SUS430 after tandem cold rolling at maximum speed over which heat scratch occurred.

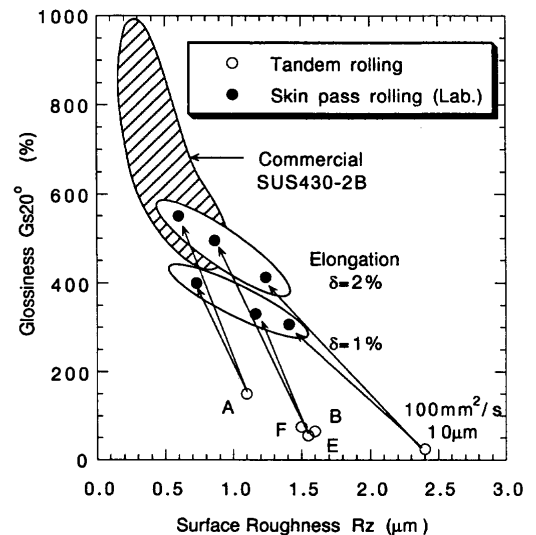


Fig. 8. Change in glossiness and roughness by skin pass rolling.

一方、ヒートスクラッチの発生が認められなかった速度範囲における表面光沢度の測定結果をFig. 7に示す。この結果からは、最もベース油粘度の高い試作油Aが、最も圧延速度が高い条件にもかかわらず、高い光沢度を示しており、エマルジョン粒径を微細化することで良好な表面光沢が得られた。

また、タンデム圧延後のSUS430鋼板を、焼鈍および酸洗処理した後にスキンパス圧延を行い、表面光沢度を測定した結果をFig. 8に示す。なお、図中には比較のために、ベース油の動粘度100mm²/s、平均粒径10μmの圧延油を使用した場合の結果を並記している。本試験結果からは、スキンパス圧延後の表面光沢度は、タンデム圧延後の表面光沢度の影響を受け、これが高いほど製品となる鋼板の光沢度が向上することが分かる。言い替えると、タンデム圧延後の表面光沢度をある程度のレベルまで高くしておかなければ、製品の光沢度を高くすることができないことになる。本試

験結果を小径レバースミルにて圧延された市販のSUS430の2B仕上げ材と比較すると、試作油A, B, E, Fによる結果は、表面光沢度としては低位ではあるものの、高粘度微細粒径エマルジョン油の効果が確認され、タンデム圧延を利用して高表面性状を有するステンレス鋼板の製造が可能であることが分かった。

6. 考察

エマルジョンのロールバイトへの導入に関しては、スターブ理論をPHL接触の挙動に対して適用した小豆島らのモデル⁷⁾が良く知られており、粒径が小さいほどロールバイト入口の隙間にトラップされ難くなり、導入油量が低下する。本研究では、このようなエマルジョン粒径の微細化効果をラボ圧延および実機タンデムミルを用いて検討することで、高粘度のベース油を用いても導入油量を低減させることが可能であることを示した。ただし、実機テストで得られた光沢度は、ラボ圧延によるものと比較して低くなっている。この理由としては、実機ラインのように多スタンドで圧延が行われる場合には、鋼板上に圧延油が付着したまま、次スタンドに送られることや、圧延油の供給量などの能力が実験条件に比べて高く、形成される油膜厚みが厚くなっていることが挙げられる。ただし、エマルジョンの導入メカニズム自身に関しても、明かになっていない点が多く、バイト入口でのエマルジョン粒子の挙動を含めて、その導入メカニズムの解明が期待される^{14),15)}。

一方、ヒートスクラッチの発生に関しては、高粘度のベース油を用いることによって防止できることを、実機テストおよびラボ実験にて確認した。すなわち、エマルジョン粒子の微細化によって、油膜厚みが低下しているにもかかわらず、高い速度域でヒートスクラッチが発生しなかった。混合潤滑状態にあるロールバイトにおいて、導入油量を低下させることは、境界潤滑部の面積を増加させ、界面温度の上昇をもたらす、ヒートスクラッチを発生させやすいものと考えられるが、ベース油の高粘度化は、そうした界面温度が上昇する影響を補って、それ以上に界面温度の上昇に対する油膜強度を向上させ得るものと考えられる。

ただし、高速四球試験を含めた一般的な実験方法では、粘度を変化させた場合に、界面における油膜厚みも同時に変化することから、同一の油膜厚みにおける油膜強度を評価することが難しい面がある。したがって、ステンレス鋼板の冷間圧延のように、鋼板の表面性状と耐ヒートスクラッチ性の両者を向上させる目的に対しては、これらの影響を分離して評価する試験方法の確立が必要であると考えられる。

ところで、試作した高粘度微細粒径型エマルジョン油の中では、試作油Aの特性が最も優れ、高い表面光沢度と耐

ヒートスクラッチ性の両立が可能となった。一方で、本開発油の実操業への適用を考えた場合、ベース油の粘度を高くした場合に、鋼板表面に付着した圧延油の脱脂性と耐汚れ性の悪化が懸念される。特に、ステンレス鋼板と普通鋼に対して、圧延油を切り替えて使用する場合には、普通鋼の表面に高粘度の圧延油が付着することで、洗浄工程における生産性を阻害する懸念もある。したがって、本圧延油の実生産への適用においては、表面光沢度および耐ヒートスクラッチ性を多少犠牲にして、脱脂性とバランスをとることも必要な検討課題であると考えられる。

7. 結言

ステンレス鋼板に代表される高い表面光沢を要求される鋼種に対して、タンデムミルを利用した製造を行うにあたって、大径ロールを用いた高速圧延の条件下で導入油量を低下させることが必要となる。ところが、導入油量の低下に伴い、ロールバイトにおける界面温度が上昇し、ヒートスクラッチが発生しやすくなる。本研究では、これらの背反する要求を満たす圧延油として高粘度微細粒径エマルジョン油を提案した。これはエマルジョン粒径の微細化によって導入油量を低減させ、ベース油の高粘度化によって広い温度範囲にわたる油膜強度を確保する、という考え方に基づくものである。本圧延油は、ラボ実験および実機タンデム圧延においても所定の特性を満足することが確認され、高表面性状と耐ヒートスクラッチ性を両立しうることを明らかにした。

文 献

- 1) 剣持一仁, 鍵田征雄, 阿部英夫, 福原昭彦, 小松富夫, 垣内博之, 岸田 朗: 材料とプロセス, 4 (1991), 492.
- 2) 小豆島明, 木原諄二, 五弓勇雄: 塑性と加工, 18 (1977), 337.
- 3) 水野高爾: 塑性と加工, 12 (1971), 369.
- 4) 升田貞和, 八木竜一, 村田幸一: 第42回塑性加工連合講演会講演論文集, (1991) 861.
- 5) 升田貞和, 八木竜一, 三宅 勝, 松野 隆, 村田幸一: 材料とプロセス, 7 (1994) 1326.
- 6) 例えば, 小豆島明, 北村晃一: 昭和61年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1986), 151.
- 7) 小豆島明, 野呂和也, 井柳好貴: 第39回塑性加工連合講演会講演論文集, (1988), 557.
- 8) 小豆島明, 野呂和也, 浅場陽一: 平成元年度塑性加工春季講演会講演論文集, (1989), 711.
- 9) 木村好次, 岡田和三: 潤滑, 29 (1984), 809.
- 10) 木村好次, 岡田和三: 潤滑, 30 (1985), 282.
- 11) 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.
- 12) 益田静三, 佐藤太紀, 新井 宏, 安富清治郎, 萩原文男, 八木政太郎: 塑性と加工, 28 (1987), 488.
- 13) 井上安正, 道谷 昇, 塚本哲也, 森 郁夫, 池田俊和: 特公平7-86199.
- 14) 中原綱光, 塩川祥二, 京極啓史: トライボロジスト, 35 (1990), 907.
- 15) D.Zhu, G.Biresaw, S.J.Clark and T.J.Kasun: Trans ASME, J. Tribol., 116 (1994), 310.