

高生産性のための冷間圧延用超硬ロールの潤滑特性の評価

小豆島 明*・神保 安広*2

Evaluation of Lubrication Characteristics of Cemented Carbide Rolls for Improved Productivity in Cold Sheet Rolling

Akira AZUSHIMA and Yasuhiro JIMBO

Synopsis : The effect of roll material on lubrication characteristics is examined by using cemented carbide rolls with different carbide contents for the purpose of improving productivity in cold sheet rolling. Coefficients of friction for reduction in thickness and limit reductions of friction pick up are measured by means of the simulation testing machine of sliding-rolling type. The effects of roll material and surface roughness on the coefficients of friction are quantitatively evaluated. On the other hand, the limit reductions are evaluated by both carbide area and carbide mean spacing. The results obtained are as follows; (1) The coefficient of friction is influenced more considerably by the surface topography of the roll than by the roll material. (2) The cemented carbide rolls have good anti-seizure property due to their carbide mean spacing. (3) If the cemented carbide roll should be applied to the actual mill, the maximum rolling speed would probably be two times faster than that of a 5%Cr-steel roll.

Key words : cold sheet rolling; lubrication; roll material; cemented carbide roll; productivity; coefficient of friction; friction pick up.

1. 緒言

鋼板の冷間圧延では強圧下、高速の操業条件で焼付きが¹⁾発生しやすく、生産性を向上する上で障害となっている。そこで著者らは潤滑剤とは別に圧延用ロールの側面からこの問題を解決することを目的として、高炭素・高クロム系およびハイス系のロール材を用いて耐焼付き性におよぼすロール材質の影響について検討した^{1,2)}。その結果、実機と同様のヒートタイプの焼付きが発生する圧延条件³⁾において、ロールの炭化物は焼付きの成長を停止させる作用があること、および炭化物面積率が30%以下のロール材の焼付き限界は炭化物の粒間間隔と非常によく相関し、炭化物間隔を小さく制御することが耐焼付き性の向上に非常に有効であることを明らかにした²⁾。さらには、生産性の飛躍的な向上を実現するために、これまでの研究に用いたロール材よりも多量の炭化物を含有した炭化物間隔の小さいロール材の研究を進める必要がある。

本研究では耐焼付き性のより大きなロール材の可能性を明らかにするため、これまでの研究で用いたロール材よりも炭化物を多く含むものとして、炭化物面積率が約50%から90%までの炭化物間隔がより小さい3種類のWCとCoの2元系超硬ロールを試験に供した。圧延実験には前報^{1,2)}と同様にすべり圧延タイプの評価試験機⁴⁾を使用し、ヒートタ

イプの焼付きが発生する圧延条件において各ロールの摩擦係数と焼付き限界を求めた。前報¹⁾より摩擦係数はロールの表面粗さに大きく影響されることが判明しているため、摩擦係数を測定する実験では比較用として5%クロム鋼ロールを用い、全てのロール材について表面粗さを変更した試験を行ってロール材質の影響と表面粗さの影響を分離して評価した。一方、焼付き限界については超硬ロールの結果のほかに前報²⁾のロール材の結果をも含め、焼付き限界と炭化物面積率および炭化物間隔の相関を調べることによって炭化物の影響を定量的に評価した。さらに、その結果をもとに実機において生産性の大幅な向上が可能な圧延用ロールについて提案したので報告する。

2. 供試ロール

直径φ76mmの評価ロールにはCoの重量%が約4, 10および20%の3種類のWCとCoの2元系超硬ロール(WC-4Coロール, WC-10CoロールおよびWC-20Coロール)を用いた。これらのロール材の化学組成をTable 1に、マイクロ組織をFig. 1に示す。炭化物面積率はWCの重量%から換算し、炭化物間隔は前報²⁾と同様の方法で画像解析装置を用いて測定した。それらの結果をまとめてTable 2に示す。3種類のロール材の炭化物面積率は約90, 70および50%で、それぞれの

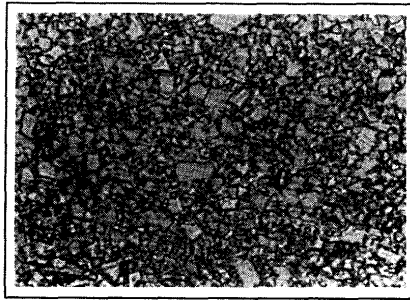
平成8年12月13日受付 平成9年3月7日受理 (Received on Dec. 13, 1996; Accepted on Mar. 7, 1997)

* 横浜国立大学工学部 (Faculty of Engineering, Yokohama National University)

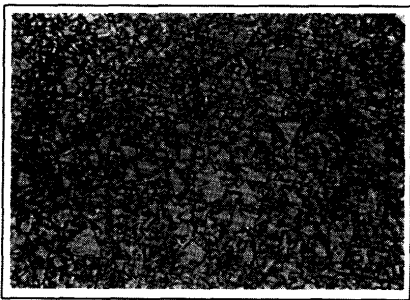
* 2 関東特殊製鋼(株)研究開発部 (Research and Development Department, Kanto Special Steel Works, Ltd., 1-3-1 Tsujido-Kandai Fujisawa 251)

Table 1. Chemical composition of WC-4Co roll, WC-10Co roll and WC-20Co roll.

Symbol	Chemical composition (wt%)		
	W	C	Co
WC-4Co	89.9	5.9	4.2
WC-10Co	84.8	5.5	9.7
WC-20Co	75.5	4.9	19.6



(a)WC-4Co 10 μm



(b)WC-10Co 10 μm



(c)WC-20Co 10 μm

Fig. 1. Microstructures of WC-4Co roll, WC-10Co roll and WC-20Co roll.

Table 2. Carbide properties of WC-4Co roll, WC-10Co roll and WC-20Co roll.

Symbol	Carbide content (area%)	Carbide mean spacing (μm)
WC-4Co	87	0.3
WC-10Co	74	0.4
WC-20Co	55	0.7

Table 3. Hardness and surface roughness of WC-4Co roll, WC-10Co roll, WC-20Co roll and 5Cr roll.

Symbol	Hardness	Surface roughness	
		Cut off length:0.8mm	Ra (μm)
WC-4Co	HRA92		0.010
			0.040
			0.123
WC-10Co	HRA89		0.010
			0.050
			0.100
WC-20Co	HRA85		0.020
			0.033
			0.113
5Cr	HRC65		0.030
			0.055
			0.090

炭化物間隔はいずれも 1 μm以下で非常に小さかった。焼付き限界を求める実験において、これらのロールは粒度#800のダイヤモンド砥石を用いて研削し、約0.04 μmRaの表面粗さに仕上げて圧延に供した。一方、摩擦係数を測定する実験では、この表面粗さのほかにラップ仕上げによる約0.01 μmRaの表面粗さと#600のダイヤモンド砥石により研削した約0.1 μmRaの表面粗さを加えた。さらに、ロール材質の比較のために前報¹⁾で使用した5%クロム鋼ロール(5Crロール)を用い、#2000、#600および#400のエメリ紙で研磨仕上げしてそれぞれ約0.03、0.05、0.09 μmRaの3種類の表面粗さに調整して実験に供した。以上のロールの粗さ曲線および平均粗さRaならびに硬さの測定結果をTable 3に示す。表面粗さはカットオフ値0.8mm、測定長さ4mmの条件で測定した。

3. 実験方法

実験には前報^{1,2)}と同様に潤滑性評価試験機を使用し、評価ロールと圧延材の速度比を約10としたすべり圧延条件で

試験した。評価ロールの速度は143m/minとした。実験手順および評価方法は前報^{1,2)}と同様であり、測定した圧延荷重と評価ロール軸で測定したトルクから摩擦係数を求めた。焼付き発生の有無は圧延材および評価ロールの表面を目視観察して判別した。

圧延材には板厚0.4mm、板幅15mm、表面粗さ0.15 μ mRaのブライツ仕上げの低炭素アルミキルド鋼の焼なまし調質材を用いた。潤滑剤には50°Cに保温した牛脂5 vol%のエマルジョンを循環して使用した。流量は1 l/minとした。

4. 実験結果

4.1 摩擦係数

ロール速度143m/minの条件において、WC-4Co、WC-10CoおよびWC-20Coの3種類の超硬ロールならびに前報¹⁾で用いた5Crロールの摩擦係数と圧下率の関係をそれぞれのロール材で表面粗さをパラメータとしてFig. 2～5に示す。ロール材質と表面粗さの全ての組み合わせ条件において、実

験を行った範囲の圧下率に対する摩擦係数の変化量は0.01以下であり、圧下率依存性は小さかった。

ロール材質および表面粗さの影響を示すために、各ロールにおいてはほぼ一定値を示す圧下率範囲での摩擦係数を測定値とし、表面粗さとの関係で整理した結果をFig. 6に示す。3種類の超硬ロールの摩擦係数はCo含有量あるいは炭化物面積率の違いにあまり影響されず、表面粗さに依存して約0.04から0.08まで増加した。これに対して5Crロールでは実験した表面粗さの範囲内で0.03～0.04の摩擦係数を示し、同程度の表面粗さにおいては超硬ロールの摩擦係数よりかなり小さな値が得られた。

4.2 焼付き限界

ロール速度143m/minの条件において、表面粗さが約0.04 μ mRaのWC-4Coロール、WC-10CoロールおよびWC-20Coロールの焼付き限界をそれぞれのロール材の炭化物面積率との関係で整理した結果をFig. 7に示す。ここで焼付き限界は前報^{1,2)}と同様に焼付き発生前後の圧下率条件で評価した。3種類のロール材の限界圧下率は図中に破線で示した

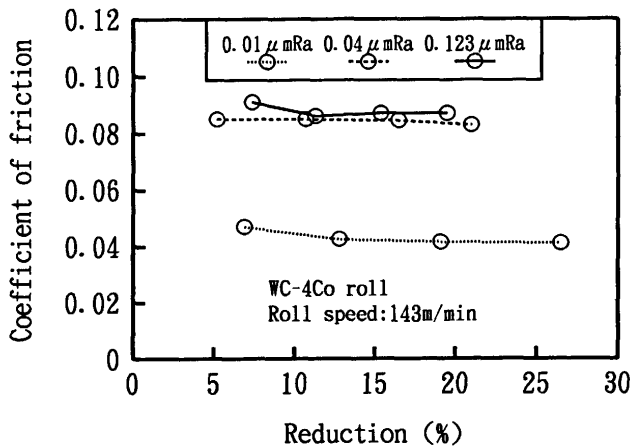


Fig. 2. Relationship between coefficient of friction and reduction in thickness of WC-4Co roll.

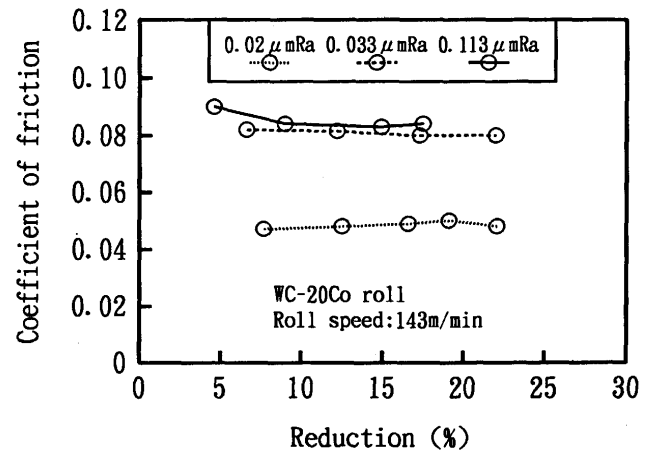


Fig. 4. Relationship between coefficient of friction and reduction in thickness of WC-20Co roll.

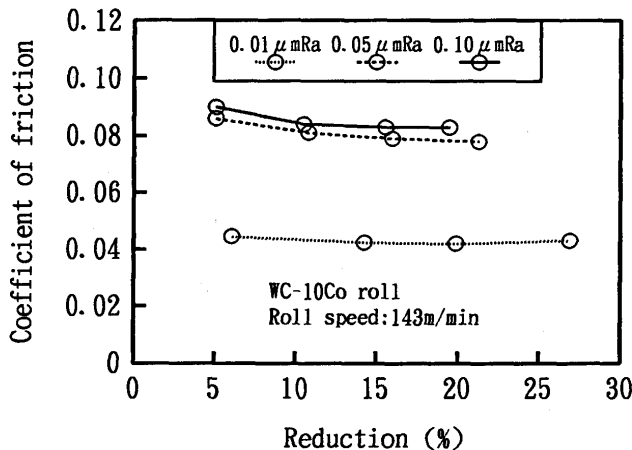


Fig. 3. Relationship between coefficient of friction and reduction in thickness of WC-10Co roll.

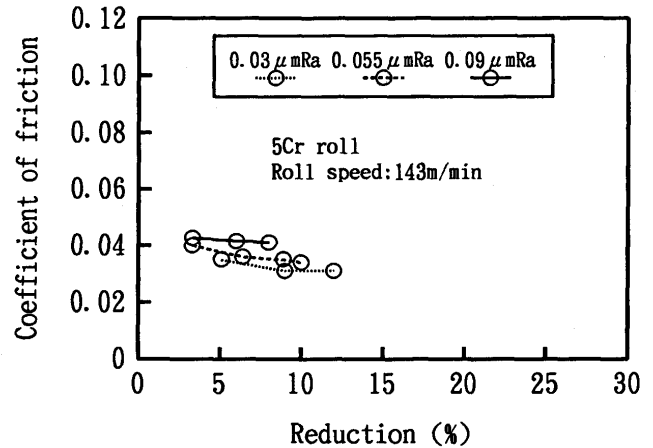


Fig. 5. Relationship between coefficient of friction and reduction in thickness of 5Cr roll.

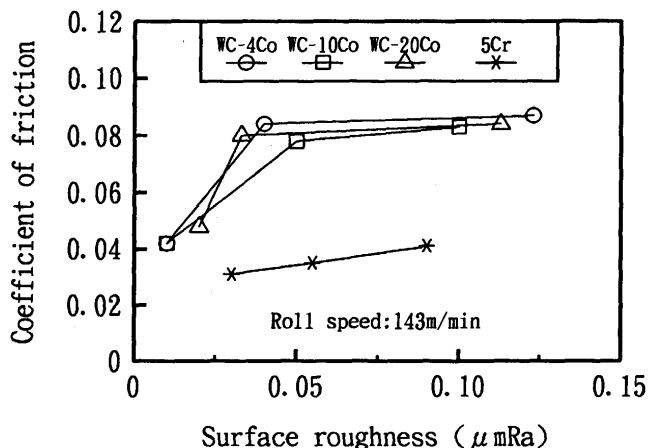


Fig. 6. Relationship between coefficient of friction and surface roughness of roll.

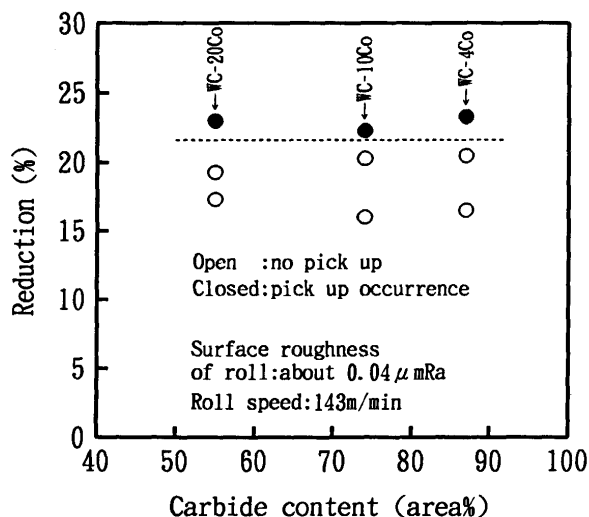


Fig. 7. Limit reductions of friction pick up for carbide content of WC-4Co roll, WC-10Co roll and WC-20Co roll.

ようにほぼ等しく、炭化物面積率とのはっきりした相関は認められなかった。

5. 考察

全てのロール材について表面粗さを変更して実験した結果、Fig. 6 から WC-4Co, WC-10Co および WC-20Co の 3 種類の超硬ロールの摩擦係数は表面粗さに依存していずれも約 0.04 から 0.08 までの増加を示し、Co 含有量あるいは炭化物面積率の違いによる影響は小さいことがわかった。一方、同程度の粗さ範囲の 5Cr ロールの摩擦係数は約 0.03 ~ 0.04 で超硬ロールよりもかなり低い値を示し、超硬と鋼のロール材質で粗さ依存性の量的な違いが認められた。

摩擦係数はロールの表面粗さに影響され、粗さが大きいほど摩擦係数は大きくなるが、工具鋼と硬質皮膜被覆材のようにロール材質が異なる場合には両者の表面粗さの値が

Table 4. Waviness of WC-10Co roll and 5Cr roll.

Symbol	Waviness		W _{CA} (μm)
	Cut off: f _n =0.08mm, f _l =0.8mm		
WC-10Co	Smooth		0.003
	Medium rough		0.011
	Rough		0.019
5Cr	Smooth		0.030
	Medium rough		0.054
	Rough		0.087

同程度でも摩擦係数にかなり大きな差が生じることが報告されている^{5,6)}。このようなロール材質で摩擦係数の粗さ依存性が異なる理由として、材質の影響のほかに粗さ曲線の形状の違いが影響している可能性がある。すなわち、超硬ロールのように硬さが非常に高いロール材は研削性が悪いため、粗さ曲線の形状を 5Cr ロールと同等に仕上げることは困難であり、表面粗さが同じ値でも形状の違いが摩擦係数の差に反映していることが考えられる。

この観点から Table 3 に示した各ロールの粗さ曲線に注目すると、3 種類の超硬ロールに比べて 5Cr ロールではいずれの粗さ曲線においても表面の起伏の間隔が広く、粗さ曲線の形状が超硬ロールと 5Cr ロールで大きく異なっていることがわかる。この形状の違いを定量的に評価するため、WC-10Co ロールおよび 5Cr ロールについて高域カットオフ値 0.08mm, 低域カットオフ値 0.8mm, 測定長さ 4mm の条件で表面うねり W_{CA} を測定した。結果を Table 4 に示す。この結果と Table 3 に示したこれらのロールの表面粗さの値を比較すると、WC-10Co ロールの表面うねりは表面粗さの値よりもかなり小さいが、5Cr ロールでは表面うねりと表面粗さが同程度の値であって起伏の間隔が 0.08mm 以上の表面うねりが表面粗さの値のほとんどを決定していたことが明らかになった。超硬ロールと 5Cr ロールの粗さ曲線をほぼ同じ形状にするため、表面うねりの影響を取り除くカットオフ値 0.08mm, 測定長さ 0.4mm の条件で WC-10Co ロールおよび 5Cr ロールの表面粗さの再測定を行った結果を Table 5 に示す。この方法で測定した 5Cr ロールの表面粗さはいずれも 0.03μmRa 未満でカットオフ値 0.8mm の条件で測定

Table 5. Surface roughness of WC-10Co roll and 5Cr roll measured by a cut off length of 0.08mm.

Symbol	Surface roughness Cut off length:0.08mm	0.2 μm 20 μm	Ra (μm)
WC-10Co	Smooth		0.009
	Medium rough		0.040
	Rough		0.076
5Cr	Smooth		0.006
	Medium rough		0.014
	Rough		0.024

したTable 3の値の1/3程度であり、カットオフ値により大きな差がなかったWC-10Coロールに比べて大きく変化していることが判明した。

次に、カットオフ値0.08mmの条件で新たに測定した表面粗さの値を用いてWC-10Coロールと5Crロールの摩擦係数の粗さ依存性を比較してみる。その前に、これらのロール材についてFig. 6の実験結果のほかに同程度の粗さ範囲での摩擦係数のデータを得るため、それぞれのロール表面を別の加工条件で仕上げ、追加実験を行った。ここで追加実験に用いた加工条件およびカットオフ値0.08mmで測定した表面粗さは、WC-10Coロールについては粒度#1000のダイヤモンド砥石による研削仕上げの0.03μmRa、5Crロールについては粒度#100および#60のWA砥石による研削仕上げの0.05および0.08μmRaとした(Table 6参照)。追加実験の結果をも含め、摩擦係数と表面粗さの関係をFig. 8に示す。同程度の表面粗さにおけるWC-10Coロールと5Crロールの摩擦係数の差は0.02以下でFig. 6の結果に比べてあまり大きくないことが確認され、約0.1mm以上の間隔の表面うねりは摩擦係数にあまり影響しないことが明らかになった。

一方、耐焼付き性について、炭化物面積率が約90、70および50%のWC-4Coロール、WC-10CoロールおよびWC-20Coロールはいずれも約21%の限界圧下率を示し、炭化物面積率による差はほとんど認められなかった。

前報²⁾において、炭化物面積率が30%以下で炭化物間隔が約10~90μmの間の高炭素・高クロム系およびハイス系のロール材の焼付き限界は炭化物間隔と非常によく相関し、炭

Table 6. Surface roughness of WC-10Co roll and 5Cr roll finished by other working processes.

Symbol	Working process	Surface roughness Cut off length:0.08mm	0.2 μm 20 μm	Ra (μm)
WC-10Co	Grinding by D#1000			0.030
5Cr	Grinding by WA#100			0.048
	Grinding by WA#60			0.080

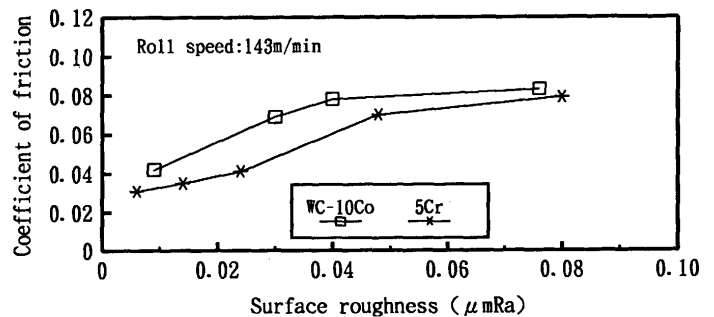


Fig. 8. Coefficient of friction for surface roughness of WC-10Co roll and 5Cr roll measured by a cut off length of 0.08mm.

化物間隔の小さいロール材ほど高い限界圧下率を示すことが判明している。今回の実験で用いたロール材の炭化物間隔はTable 2に示したようにいずれも1μm以下であり、前報²⁾のロール材の炭化物間隔に比べて非常に小さかった。

そこで3種類のロール材の限界圧下率(Fig. 7)をそれぞれの炭化物間隔との関係で整理し直し、前報²⁾のFig. 8およびFig. 9で示したロール速度143m/minの条件におけるロール材の焼付き限界と比較した結果をFig. 9に示す。3種類のロール材の限界圧下率は前報²⁾のロール材の焼付き限界のほぼ延長線上にあり、炭化物間隔に依存した焼付き限界のほぼ極限を示すことが判明した。

次に、この炭化物間隔依存性が別のロール材にもあてはまるか確認した。一例として、著者の一人が今回と同様の実験で得たTRD処理によるVC皮膜被覆ロールの焼付き限界の結果³⁾を引用した。ロール速度143m/minの条件におけるVC皮膜被覆ロールの限界圧下率は約22%であり、Fig. 9から示唆される限界圧下率の極限の約21%にほとんど合致することが確認できた。この結果から超硬やVC皮膜被覆材が炭化物による耐焼付き性向上の効果のほぼ極限を示すロール材であることが理解できた。

さらに、この優れた耐焼付き性を有するロール材の一つであるWC-10Coロールを実機の冷間圧延に適用した場合の

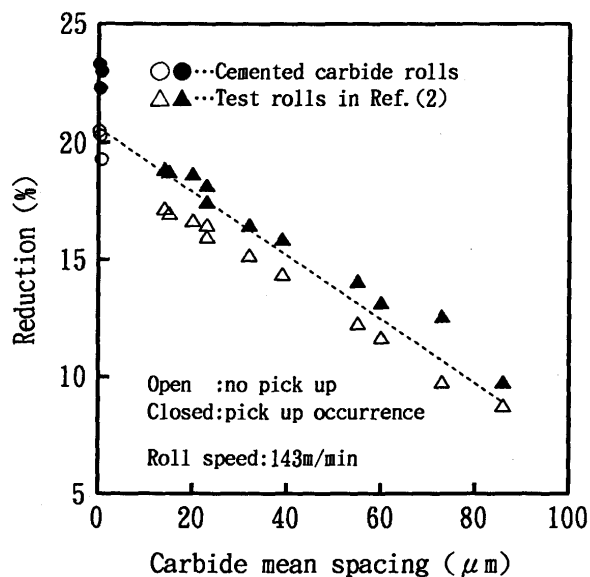


Fig. 9. Limit reductions for carbide mean spacing of cmented carbide rolls and test rolls in Ref. (2).

圧延速度向上の効果について、前報^{1,2)}と同様に著者の一人が提案している焼付きの評価システム⁷⁾を用いて推定した。5スタンドのタンデムミルの普通鋼圧延のデータ⁸⁾を用い、焼付き限界におけるWC-10Coロールの圧延速度を算出した。ここでWC-10Coロールの熱伝導率および温度伝導率はそれぞれ75W/mK, $28 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ とした。実験結果であるWC-10Coロールの限界圧下率(約21%)から換算した平均界面温度上昇は82°Cであり、前報¹⁾で求めた汎用の5Crロールの50°Cよりも32°C高い結果が得られた。この温度差をもとに焼付きが発生した実機のNo. 4スタンドにおけるWC-10Coロールの限界圧延速度を逆算すると3120m/minに達する。この値

は5Crロールの限界圧延速度(1270m/min)の約2.5倍であり、実機における生産性の飛躍的な向上が期待できる。

6. 結言

炭化物面積率が約90, 70および50%で、炭化物間隔が前報^{1,2)}のロール材に比べて非常に小さい3種類の超硬ロールを用い、普通鋼の冷間圧延における潤滑性および耐焼付き性におよぼすロール材質の影響について検討した。潤滑性の尺度として摩擦係数を評価し、ロール材質と表面粗さの影響を分離して評価した。耐焼付き性については焼付き限界における圧下率を求め、この限界圧下率とロール材の炭化物面積率および炭化物間隔の相関を調べて次の結論を得た。

(1) 表面うねりを取り除いた表面粗さの値が同程度の場合、ロール材質の違いによる摩擦係数の差はあまり大きくない。

(2) 3種類の超硬ロールは炭化物間隔に依存した焼付き限界を示し、いずれも非常に優れた耐焼付き性を有する。超硬ロールを実機に適用した場合、限界圧延速度を5%クロム鋼ロールの2倍以上に向上できる可能性がある。

文 献

- 1) 小豆島明, 神保安広, 金田敏明: 鉄と鋼, 81 (1995), 64.
- 2) 小豆島明, 神保安広: 鉄と鋼, 81 (1995), 1150.
- 3) 小豆島明, 喜多良彦, 志磨貴司, 三橋 勝: 鉄と鋼, 74 (1988), 1978.
- 4) 小豆島明: 鉄と鋼, 74 (1988), 696.
- 5) A. Azushima and Y. Morita: ISIJ Int., 32 (1992), 1232.
- 6) 堂田邦明, 鶴飼直行, 土屋能成, 新井 透: 第40回塑性加工連合講演会講演論文集, (1989), 231.
- 7) 小豆島明, 喜多良彦: 鉄と鋼, 76 (1990), 1270.
- 8) 木村好次, 岡田和三: 潤滑, 29 (1984), 809.