
冷延プロセスロールの長寿命化技術

Techniques for Extending Service Line of Rolls in Cold Rolling Process

佐藤 裕二 (Yuji Sato) 緑川 悟 (Satoru Midorikawa) 岩下 義春 (Yoshiharu Iwashita) 横川 昭夫 (Akio Yokogawa) 高野 武 (Takeshi Takano)

要旨：

近年の薄鋼板、表面処理鋼板への品質要求の高度化にこたえ、かつ、定期修理延長による生産性向上を図るため冷延プロセスにおける各種ロールの材料技術・表面改質技術の研究開発を行ってきた。リングロールでは、液絞り機構の理論的解明によって、高剛性で耐摩耗性と耐食性に優れた不織布ロールを開発した。プロセスラインのストリップ張力制御を行うプライドルロールでは、WC系サーメット溶射にめっきを加え、さらに粗度調整を施す表面改質技術により、耐スリップ性と耐摩耗性に優れた溶射ロールを開発した。コンダクタロールでは、WC含有自溶性合金をプラズマ溶射し、さらにヒュージングを加えた皮膜形成法の開発により飛躍的な耐食耐摩耗性を得た。これらにより、冷延プロセスロールの高い信頼性と長寿命化が図られた。

Synopsis：

Research on various types of rolls in the cold rolling process has been under way for development of material and surface reforming techniques so as to meet the needs for higher-quality sheet steel and surface treated steel sheets and to improve productivity by extending periodical repair intervals. Nonwoven-fabric rolls that excel in rigidity, wear resistance, and corrosion resistance have been developed as wringer rolls based on the theoretical elucidation of a wringing mechanism. For bridle rolls expected to control the strip tension in the production line, the surface reforming techniques - which include thermal spraying of WC type cermet that maintains optimal surface roughness and the shape, together with plating, and roughness preparation techniques - has been developed to improve slip resistance. Developed for conductor rolls is the coating formation method in which a WC-containing self-fluxing alloy is subjected to plasma spraying and fusing to obtain dramatic corrosion and wear resistance. Thus, highly reliable rolls with a long service life in the cold rolling process have been materialized.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

Techniques for Extending Service Life of Rolls in Cold Rolling Process



佐藤 裕二
Yuji Sato

千葉製鉄所 設備技術
部設備技術室 主査(掛
長)



緑川 悟
Satoru Midorikawa

千葉製鉄所 設備技術
部設備技術室



岩下 義春
Yoshiharu Iwashita

千葉製鉄所 設備技術
部設備技術室



横川 昭夫
Akio Yokogawa

千葉製鉄所 設備技術
部設備技術室 主査(部
長補)



高野 武
Takeshi Takano

千葉製鉄所 設備技術
部設備技術室長(部長)

1 緒 言

冷延プロセスにおけるロールは千葉製鉄所だけでも9000本を超える。これらのロールは冷延最終製品と接触することから表面品質へ影響を及ぼすため、高度な信頼性と管理が要求される。

これらの要求に対し、従来は表面改質方法として硬質Crめっきやゴムロールの改良研究^{1,2)}、さらにロール素材の研究^{3,4)}が報告されている。また、当所でも表面改質技術の改良⁵⁻⁸⁾を図ってきた。

しかし、製品品質の高度化と生産プロセスの多様化、高速化に伴い、従来の改良技術の適用では製品への影響や生産ライン全体の信頼性を保証できる期間が短くなった。

そこで、長期にわたり製品品質を保証できるロールを得るために材料技術・表面改質技術の更なる改良を図った。

技術改良に当たっては、全プロセスロールを使用目的によって分類し、それらの要求機能と性能を明らかにした。それによって数千本のロールは数種類の基礎技術を確立することで長寿命化できるこ

要旨

近年の薄鋼板、表面処理鋼板への品質要求の高度化にこたえ、かつ、定期修理延長による生産性向上を図るため冷延プロセスにおける各種ロールの材料技術・表面改質技術の研究開発を行ってきた。リングロールでは、液絞り機構の理論的解明によって、高剛性で耐摩耗性と耐食性に優れた不織布ロールを開発した。プロセスラインのストリップ張力制御を行うブライドルロールでは、WC系サーメット溶射にめっきを加え、さらに粗度調製を施す表面改質技術により、耐スリップ性と耐摩耗性に優れた溶射ロールを開発した。コンダクタロールでは、WC含有自溶性合金をプラズマ溶射し、さらにヒュージングを加えた皮膜形成法の開発により飛躍的な耐食耐摩耗性を得た。これらにより、冷延プロセスロールの高い信頼性と長寿命化が図られた。

Synopsis:

Research on various types of rolls in the cold rolling process has been under way for development of material and surface reforming techniques so as to meet the needs for higher-quality sheet steel and surface treated steel sheets and to improve productivity by extending periodical repair intervals. Nonwoven-fabric rolls that excel in rigidity, wear resistance, and corrosion resistance have been developed as wringer rolls based on the theoretical elucidation of a wringing mechanism. For bridle rolls expected to control the strip tension in the production line, the surface reforming techniques—which include thermal spraying of WC type cermet that maintains optimal surface roughness and the shape, together with plating, and roughness preparation techniques—has been developed to improve slip resistance. Developed for conductor rolls is the coating formation method in which a WC-containing self-fluxing alloy is subjected to plasma spraying and fusing to obtain dramatic corrosion and wear resistance. Thus, highly reliable rolls with a long service life in the cold rolling process have been materialized.

とがわかった。

本報告では冷延プロセスロールに要求される諸性能を示すとともに、冷延プロセスで主要なリングロール、ブライドルロールおよびコンダクタロールにおける材料技術・表面改質技術について述べる。

2 要求性能と開発のアプローチ

リングロール、ブライドルロールおよびコンダクタロールは冷延プロセスで使用されてるロール総数本の8割を占める。

リングロールは、鋼板表面の酸洗やアルカリ洗浄ラインでの温水

* 平成4年10月23日原稿受付

洗浄液を絞り取るための設備である。したがって、ロール表面部は鋼板表面の液絞り機能を高めるための高剛性と鋼板の板幅両端からの液の回り込みを阻止するために適度な弾性が必要である。

液絞り機能を高めるために強い線圧をかけると、板幅端部の偏摩耗¹⁾と切り傷が生ずるので耐摩耗性、耐カット性が要求される。さらに、酸洗液やアルカリ液が温水に含まれるので耐食性も必要とされる。従来は、ゴムロールが適用されており、耐食性に優れるものの、液絞り機能と機械的性質に不満があった。

ブライドルロールは、連続酸洗ライン、連続焼鈍ラインや連続めっきラインにおける冷延鋼板のライン張力を制御する機能を受持っている。ライン張力を制御する機能はロール表面の粗さによるグリップ力によって生ずるので、耐スリップ性を維持する適当な表面粗さとその粗さを適正範囲で長期間維持できる耐摩耗性が要求される。従来は、Crめっきが適用されており、耐摩耗性が不足していた。

コンダクターロールは、電気錫めっき鋼板製造の際の電極となるロールであるため、良電導体材料が必要である。このロールは強酸性めっき液による腐食と錫めっきの粉体による摩耗によって損耗し、安定通電を妨げるようになるので耐食性と耐摩耗性が要求される。

従来のCrめっきロールでは、割れや気孔から浸入した錫めっき液による腐食によってCrめっき層がはく離し、寿命が短かった。

これらのロールに要求される性能と研究開発課題、アプローチを

Fig. 1に示す。

3 リンガロールの長寿命化技術

3.1 液絞り性の検討

リングロールには一般に鋼板になじみやすいネオプレン、ハイパロン等のゴムが被覆されている。これらの材料は、硬度および剛性が低いため、鋼板の板幅端部に摩耗やカットによって鼓形の損耗形態¹⁾となり、液絞り性が低下し寿命に至る。さらに、最近の高速生産ラインでは液絞り性を確保するため高圧下で使用されており、ロールの高速回転と線圧の増大によって材料内部で発熱・蓄熱が生じ、温度が上昇する。その結果、材料の耐熱限界を超えゴム層間で剝離し液絞り機能を失う現象が現れる。したがって、長寿命化に当たっては液絞り性を従来と同等に保ち、かつ耐摩耗性、耐カット性、耐熱性に優れた被覆材を適用する必要がある。そこで、液絞り性に及ぼす材料特性と使用条件の関係を推定するため、歯車の油膜推定に適用されているHerrerrughの式²⁾を導入して検討した。

式を以下に示す。

$$h = 3.1E^{-0.2}R^{0.6}\gamma^{0.6}U^{0.6}W^{-0.2} \quad (1)$$

h : 液膜厚み (μm)

E : 弾性係数 (Pa)

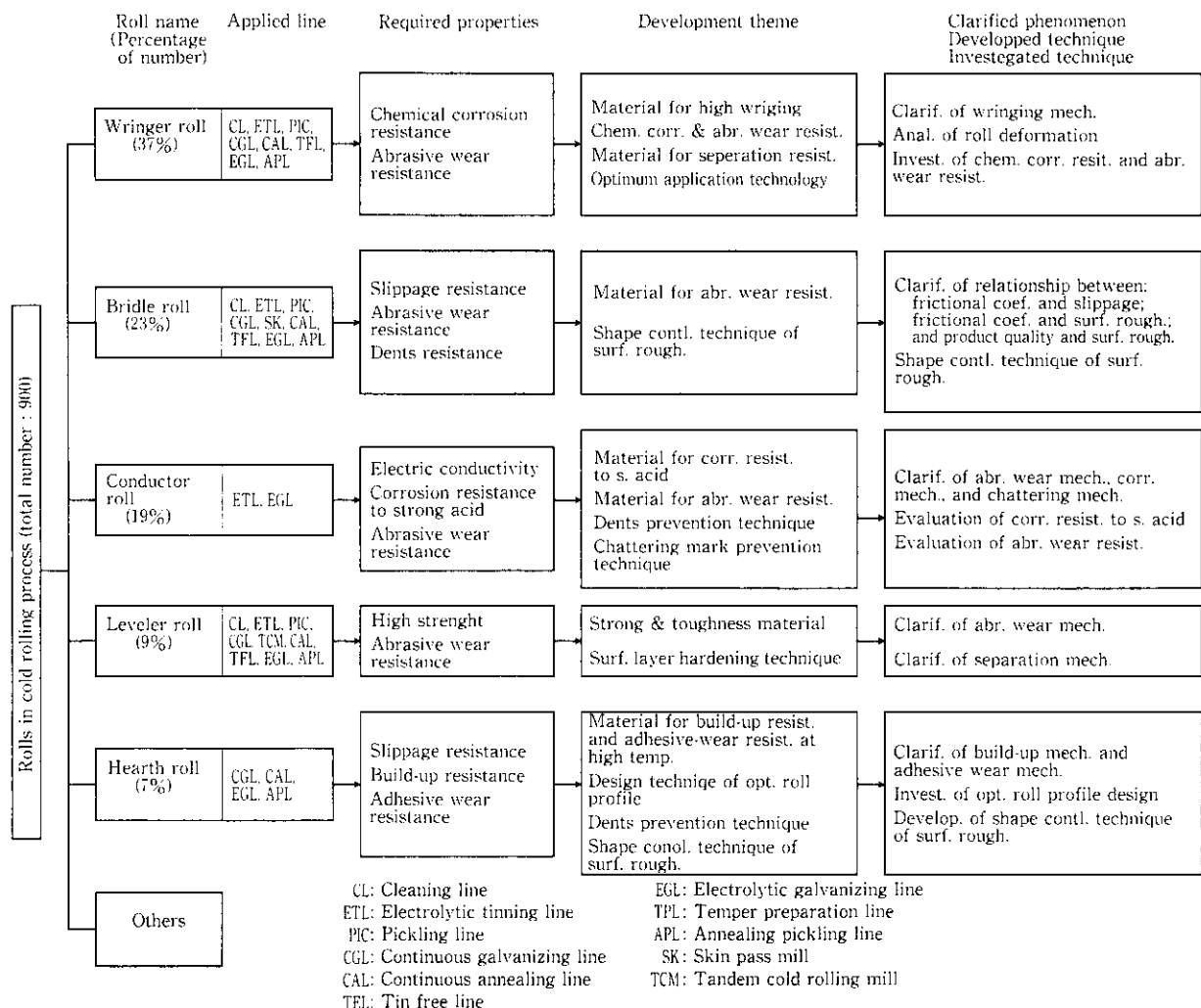


Fig. 1 Approach for extending service life of rolls in cold rolling process

R : 曲率半径 (m)

η : 大気圧粘度 (Pa·s)

U : ロール周速 (m/s)

W : 線圧 (N/m)

設備仕様が一定の場合 (1) 式は以下になる。

$$h = 3.1E^{-0.2}W^{-0.2} \dots \dots \dots (2)$$

第 (2) 式によると液膜厚みを小さくできる材料は、弾性係数が大きく、線圧を大きくできる材料であると言える。

つぎに、この式が円筒と鋼板の間の液絞り性に適用できるかを実験で確認した。実験方法を Fig. 2 に示す。まず、鋼板をオイルに浸しておき、次に上方のロールで絞りながら鋼板を引き上げ、その前後の重量差を測定する。この重量差を絞りきれなかった油の量 (残油量) と定義し、液絞り性を評価した。材質はネオプレン被覆同士の組み合わせと、ネオプレン被覆と鋼製 (S35C) の組み合わせとした。実験結果を Fig. 3 に示す。図から明らかなように、残油量は弾性係数の大きい鋼製ロールを用いている方が少ない。したがって、(2) 式は液絞り性の検討に適用できることがわかった。

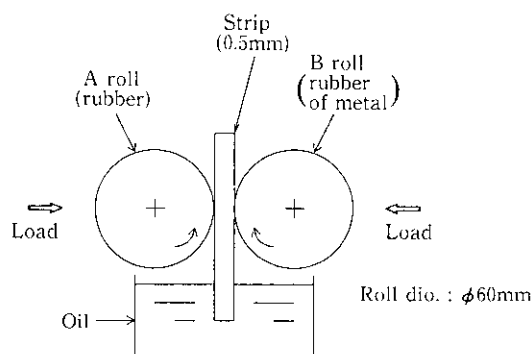


Fig. 2 Schematic diagram of wringing test

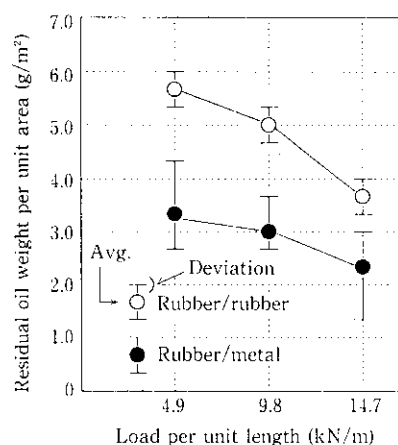


Fig. 3 Result of wringing test

鋼製ロールは、機械的性質、熱的性質に優れ、実験により液絞り性にも優れていることがわかったが、鋼板に塑性歪みやスリ疵を与えることもわかった。すなわち、鋼製ロールを実用化すると鋼板の形状不良、スリ疵が懸念される。そこで、FEM 解析により各種材料の組み合わせにおける面圧と線圧の関係を計算した。解析には FEM 解析汎用プログラム「MARC」を使用した。解析材料の一例を Table 1 に示す。また、解析結果を Fig. 4 に示す。

Table 1 に示した高剛性不織布ロールとゴムロールの組み合わせ¹⁹⁾

Table 1 Mechanical properties of lining materials

Material	Hardness* H_s (JIS A)	Elastic coefficient (N/mm ²)	Temperature of heat resistance (°C)
Nonwoven fabric	95	1000	375
Rubber (CR)	75	4	120

* JIS K6301

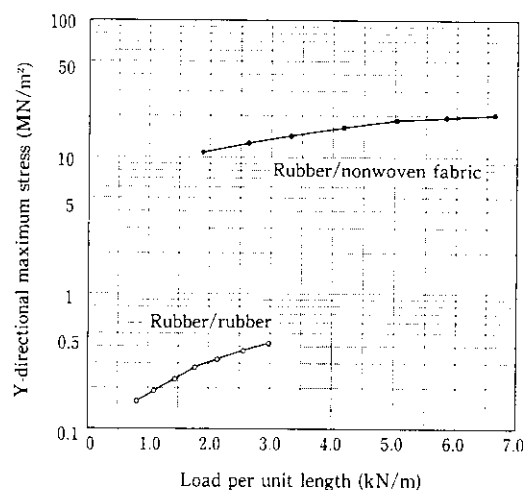


Fig. 4 Comparison of Y-directional maximum stress (compression) between rubber/nonwoven fabric and rubber/rubber rolls

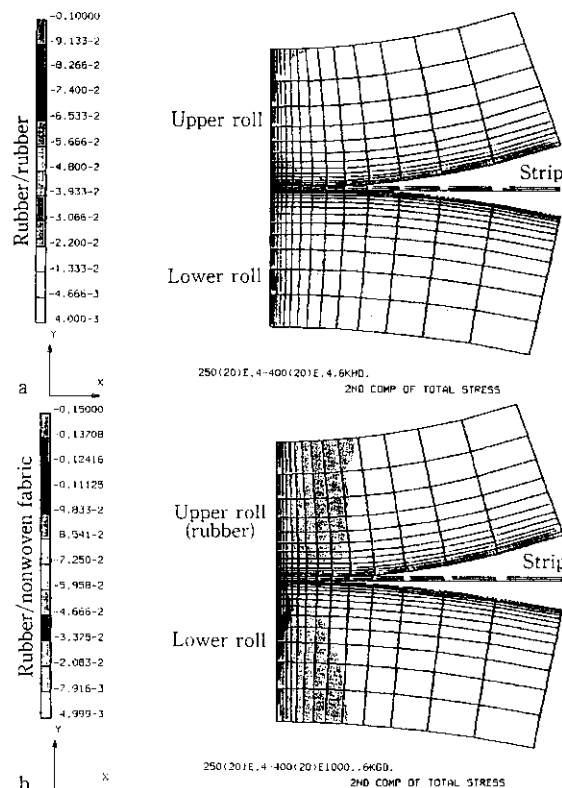


Fig. 5 Stress distribution at contact area of wringer roll using MARC

では、ゴムロールとゴムロールの組み合わせに比べて 30 倍近い面圧が得られる。線圧 $1.8 \times \text{kN/m}$ における応力分布を Fig. 5 に示す。図に示すように、同じ線圧において高剛性材料を一方に適用する

ことにより高剛性ロールと鋼板の接触部に高い面圧が生ずる。このことから、液絞り性を高めるためにはロールの剛性を高め、同じ液絞り性を得るためには線圧を下げればよいことがわかる。

したがって、線圧を下げることにより耐摩耗性を優先させたい使い方ができることがわかる。

3.2 被覆材料の耐熱性評価

高剛性不織布を使うことにより、従来以上の液絞り性が得られることがわかった。しかし、不織布もゴムと同じ高分子材料であるため、熱伝導率が低い。そこで、高回転・高圧下時の材料内部における発熱が懸念されるので、温度上昇実験を行った。実験方法を Fig. 6 に示す。テストロールの被覆材料内部2箇所（被覆材料の1/2t および表面から5mm 内側）に熱電対を取付け、駆動ロールに押しつけて高回転・高圧下条件でテストロール内部温度を測定した。また、試験ロールとしてネオプレン（ゴム）および不織布（樹脂）を用いた。

測定結果を Fig. 7 に示す。ネオプレンでのA点の温度は80°C 近くまで上昇し、一方不織布のA点の温度は65°C まで上昇した。すなわち、不織布の方が高回転、高圧下時において内部発熱が小さく、かつ耐熱温度は350°C 以上なので熱的性質にも優れていることがわかる。

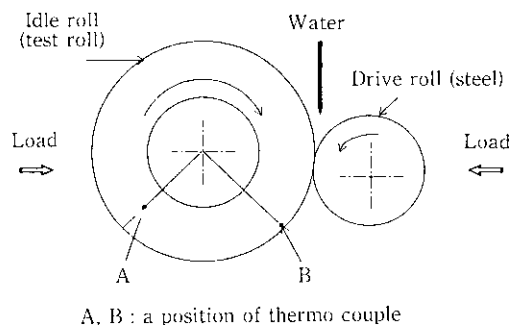


Fig. 6 Schematic diagram of measurement of the temperature of wringer roll

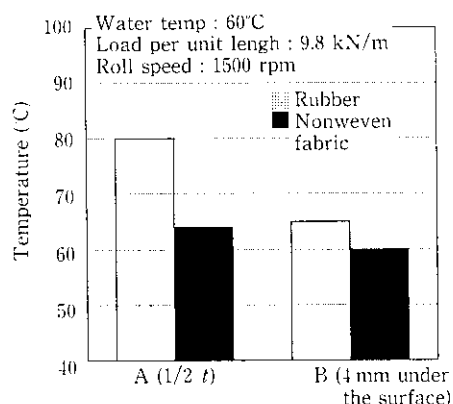


Fig. 7 Results of measurement of the temperature of wringer roll

3.3 生産設備における総合評価

弾性係数の大きい被覆材料は液絞り性に優れ、耐熱性にも優れていることがわかり、しかも硬度が高く耐摩耗性に優れていると考え

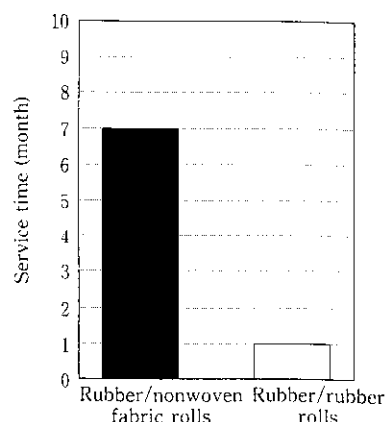


Fig. 8 Results of field test in electrolytic cleaning line

られるので、電解洗浄設備のクリーニングタンク出側にて実験を行った。用いた被覆材料は Table 1 に示す高剛性不織布ロールである。

ロール使用期間を調査した結果を Fig. 8 に示す。従来のゴムロールは1箇月の使用で摩耗により液絞り性が低下し、取替えられたが、高剛性不織布ロールは摩耗速度が小さく7箇月間使用できた。

4 ブライドルロールの長寿命化技術

4.1 表面改質方法と材料の選定

ブライドルロールは表面粗度が低下することによって冷延鋼板との間でスリップを生じ、張力制御機能を失う。一方、初期粗度を高くして長期間その機能を維持させようとすると冷延鋼板に押し疵を生じさせる。したがって、最適な粗度範囲を維持させえる改質方法と材料が必要である。そこで、プラズマ溶射に比較し、硬質粉体材料が溶融消失しにくく緻密な被膜がえられる爆発溶射法¹¹⁾を選定し、また、サーメットの中でも高い硬度が得られる WC 系サーメットを選定した。88 WC—12 C₀ の材料はピッカース硬度で1150 が得られるので、優れた耐摩耗性が期待できる。

4.2 表面粗さ形状の調製技術

Cr めっきと溶射の表面粗度形状の写真を Photo 1 に示す。Cr めっきの表面粗度形状はめっき付着時球状に粒成長するため丸みをおびた形状が得られるが、溶射表面は鋭い粗度形状の連続体であり、溶射ままでは冷延鋼板に押し疵が発生する。

さらに、鉄粉が付着、積層し易く、凸形状となり押し疵を助長させることが予測される。前者に対し、バフや砥石による研磨により鋭い表面粗度形状の山の部分を滑らかにすることができる。しかし、研磨しすぎると摩擦係数が低下しスリップが発生する。そこで、必要摩擦係数を確保できるバフ研磨仕様を検討した。

表面粗度形状と摩擦係数の関係を明らかにするため摩擦係数測定装置を考案した。構成を Fig. 9 に示す。試験ロールを固定した状態で冷延鋼板の一方に錘を取付けて一定張力を与え、他方には張力を増加させ鋼板が動いた時点の張力をロードセルにて測定した。

摩擦係数は次式を用いて算出した。

$$T/W = \exp(\mu\theta)$$

T : 測定張力 (N)

W : 錘重量 (N)

μ : 摩擦係数

θ : まきつき角 (°)

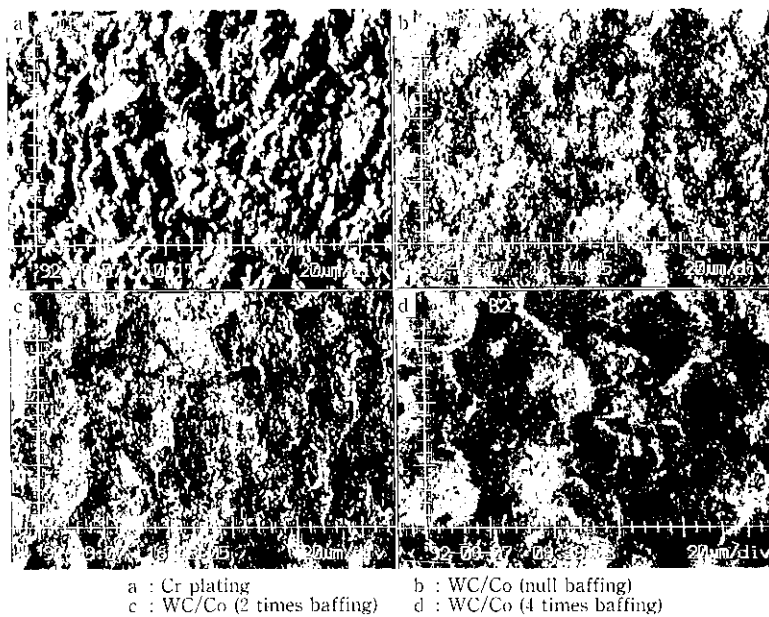


Photo 1 Optical microphotographs of surface roughness shape of bridge rolls

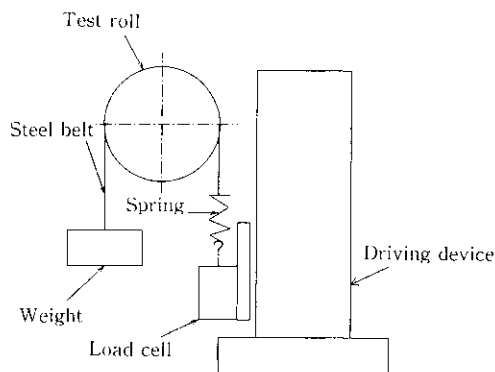


Fig. 9 Test method for measuring frictional coefficient of bridge roll

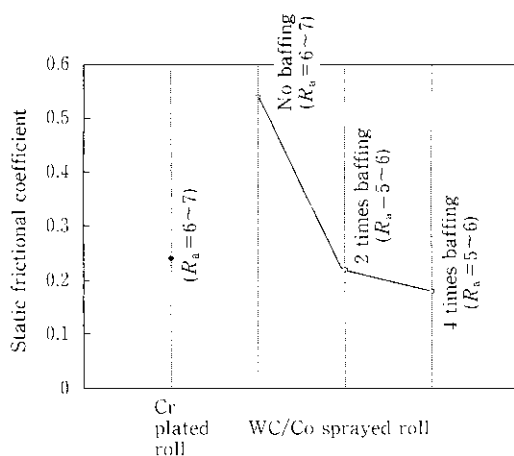


Fig. 10 Comparison of frictional coefficients of bridge roll

摩擦係数測定結果を Fig. 10 に示す。図中の R_a は中心線平均粗さ (JIS B0601 による), また R_{max} は最大高さ (JIS B0601 による) である。WC 系溶射ロールでは, 粗度の山の部分から $1/2 R_{max}$

の相対負荷長さが 50% になるように 2 回バフ研磨したものは, 溶射ままロールにくらべ, 摩擦係数は半分以下に低下することがわかる。さらに, 粗度の山部から $1/2 R_{max}$ の相対負荷長さが 70% になるように 4 回バフ研磨すると摩擦係数は 0.2 未満になる。一方, Cr めっきロールの摩擦係数は 0.24 である。

したがって, Cr めっきと同様の粗さ形状に調製するには 2 回バフ研磨が必要である^{12,13)}。さらに, 粗度の谷部に対して鉄粉付着防止のため, めっきを加えた¹⁴⁾。

4.3 生産設備における総合評価

連続焼鈍ラインのテンションレベラー前後のブライドルロールに WC 系溶射を施し, 従来の Cr めっきロールとの比較試験を行った。その結果を Fig. 11 に示す。従来の Cr めっきロールは 8 箇月で粗度が 6.0 から $2.0 \mu m R_a$ に低下しスリップが発生した。

これに対し, 溶射ロールは 6.0 から $3.0 \mu m R_a$ に低下するまでに 36 箇月を要し, さらに継続使用している。もちろん, 当初から押し疵の発生はない。

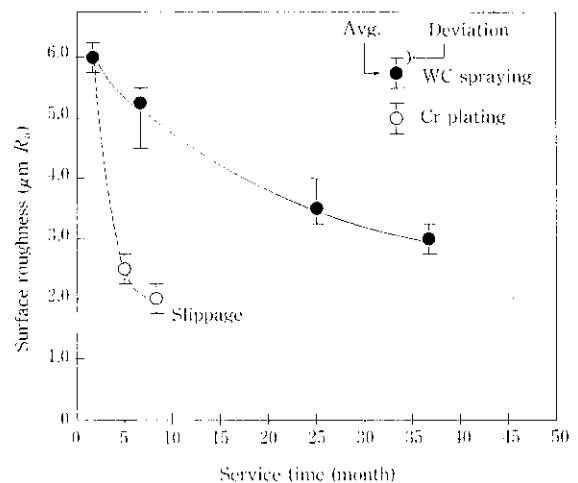


Fig. 11 Change in surface roughness of bridge rolls at continuous annealing line

5 コンダクタロールの長寿命化技術

5.1 被覆材料と溶射法の選定

コンダクタロールは電気伝導性のほかに耐食性と耐摩耗性が要求される。溶射材料の中で電気伝導性を有し、耐食性と耐摩耗性に優れる材料として Ni 基あるいは Co 基の自溶性合金がある。しかし、電気めっき設備のめっき液は塩酸、ふっ酸などを混合した強酸性水溶液であるから、その耐食性を評価する必要がある。

そこで、JIS H 8303 で定める自溶性合金の中から Ni 基自溶性合金、WC を含有する Ni 基自溶性合金および Co 基自溶性合金を選定し、従来の被覆材料である Cr めっきと特性を比較した。

被覆材の化学組成と硬度を Table 2 に示す。一般に、自溶性合金の溶射は JIS Z 3001 で定める粉末溶射法が用いられているが、溶射粒子の飛行速度が比較的低く、形成される皮膜は多孔質になりやすい⁽¹⁵⁾。そこで、プラズマ溶射法を用い、溶射ままでも気孔の少ない状態にし、さらにヒュージングを加えた。MSF-WC2 の硬度は HV 500 以上あり、含有する WC 粒子は HV 1800~2000⁽¹⁶⁾ であるため、皮膜の緻密さと合わせて高い耐食・耐摩耗性が期待できる。

5.2 腐食試験による耐食性評価

腐食試験の液組成は一般のめっき液を用い、液温は反応促進のため 90°C と実際よりも若干高めに設定した。皮膜以外はカーボン

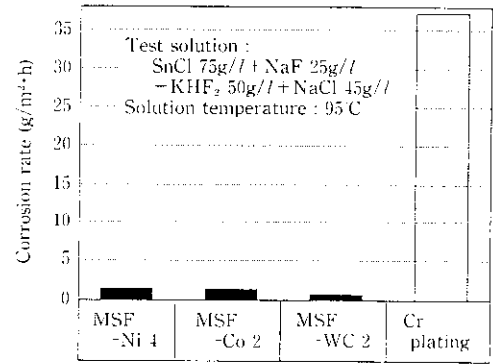


Fig. 12 Comparison of corrosion rate between self-fluxing alloys and Cr plating used for conductor roll

樹脂でマスキングを施した。また、耐食性の評価は、静止液中に 48 時間浸漬後、腐食減量で評価した。試験結果を Fig. 12 に示す。

自溶性合金溶射皮膜はいずれも従来の Cr めっき皮膜に比べ耐食性に優れ、中でも MSF-WC2 皮膜は腐食減量が Cr めっき皮膜の約 1/50 である。腐食試験前後の両者の表面状態を Photo 2 に示す。

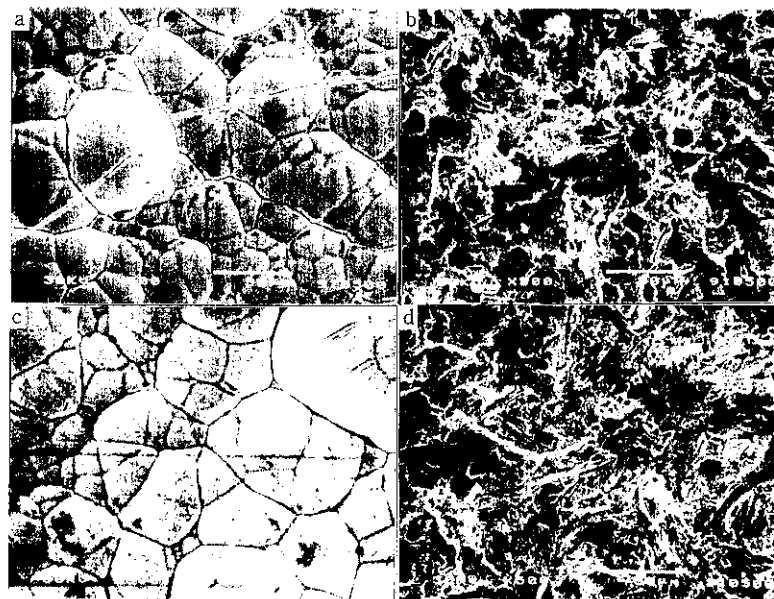
Cr めっき皮膜では結晶粒界が選択的に腐食されているのに対し、MSF-WC2 皮膜ではほとんど腐食されていない。

このような腐食環境下では、Cr めっき皮膜は均一な不動態を維持することが難しいものと思われる。

Table 2 Typical chemical composition and hardness of self-fluxing alloy for conductor rolls

Type	Chemical composition (wt%)											Hardness (HV)
	Ni	Cr	B	Si	C	Fe	Co	Mo	Cu	W	WC*	
MSF-Ni 4	Bal.	16.0	4.0	4.0	0.5	2.5	—	3.0	3.0	—	—	500~700
MSF-Co 2	13.0	19.0	3.0	3.0	1.0	4.0	Bal.	—	—	13.0	—	500~800
MSF-WC 2	Bal.	11.0	2.5	2.5	0.5	2.5	—	—	—	—	35.0	500~700
Cr plating	—	>99.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	700~1000

* WC: 1800~2000



a : Cr plating before corrosion test b : MSF-WC2 before corrosion test
 c : Cr plating after corrosion test d : MSF-WC2 after corrosion test

Photo 2 SEM photographs of Cr-plating and MSF-WC2 plasma spray

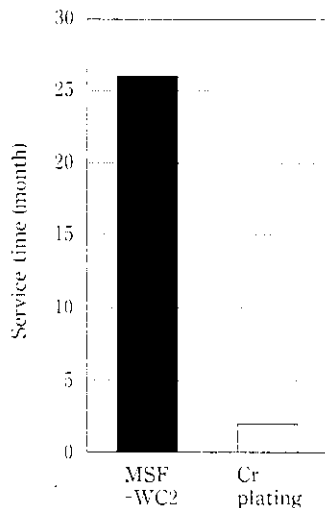


Fig. 13 Result of field test in electrolytic tining line

5.3 生産設備における総合評価

MSF-WC2の溶射皮膜が耐食性に優れかつ十分な硬度も有していることがわかった。そこで、皮膜厚み1.0 mmを有するコンダクタロールを製作し電気錫めっき設備にて試験を行った。その結果をFig. 13に示す。従来のCrめっきロールは母材露出により寿命が

2箇月である。一方、溶射ロールは26箇月使用することができ、皮膜厚みの摩耗量は0.4 mmであった。これにより、溶射ロールは再研磨することにより4年以上の皮膜寿命が期待できる。

6 結 言

近年の製品品質の高度化と生産プロセスの多様化・高速化に対応し、冷延プロセスロールに要求される諸性能に優れる材料・表面改質技術の研究開発と実用化を進めてきた。

その結果、以下に示す成果が得られた。

- (1) リンガロールでは液絞り機構の解明によって、高剛性で耐摩耗と耐食性に優れた不織布ロールを開発し、従来の7倍の寿命を確認した。
- (2) ブライドルロールではWC系サーメット溶射にめっきを加え、さらに、粗度調整を施す表面改質技術を開発し、従来の5倍以上の寿命が得られた。
- (3) コンダクタロールではWC含有自溶性合金をプラズマ溶射しさらに、ヒュージングを加えた皮膜形成法を開発し、13倍の寿命を得た。

これらの成果は、今後の新技術適用拡大により、高品質冷延製品の供給と安定操業に寄与するものと考ええる。最後に、溶射技術については、トーカロ株式会社、第一高周波工業株式会社の関係諸氏に種々のご協力を頂いた。ここに感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 倉橋基文, 今村公平, 永井裕和: 鉄と鋼, 72 (1986) 12, S1192
- 2) L. W. Legacy: *Iron and steel Engineer*, 60 (1983) 4, 42
- 3) 田中希親: 三菱製鋼技報, 17 (1983) 1~2, 55
- 4) 大島嘉光, 水口政明: 日本ステンレス技報, (1988) 23, 125
- 5) 柳沢章博, 笠井 聡, 市原 晃, 藤沢昭雄: 鉄と鋼, 73 (1987) 12, S1046
- 6) 川崎製鉄㈱: 特開昭 6201680
- 7) 笠井 聡, 佐藤裕二, 柳沢章博, 市原 晃, 大西 廣: 川崎製鉄技報, 19 (1987) 1, 64
- 8) 緑川 悟, 笠井 聡, 市原 晃, 柳沢章博, 坂本敬一郎: 材料とプロセス, 3 (1990) 2, 438
- 9) 出光興産編: 「歯車の潤滑」, (1988), 3, [出光興産]
- 10) 川崎製鉄㈱: 特開平 03285100
- 11) 溶接学会編: 「溶接・接合便覧」, (1990), 715, [丸善]
- 12) 川崎製鉄㈱: 特開平 02052110
- 13) 川崎製鉄㈱: 特開平 03099715
- 14) 川崎製鉄㈱: 特開昭 6201680
- 15) 溶接学会編: 「溶接・接合便覧」, (1990), 714, [丸善]
- 16) 溶接学会編: 「溶接・接合便覧」, (1990), 731, [丸善]