

高性能冷間圧延用CPCハイスロール

High Speed Steel Type Cold Rolling Mill Roll by Continuous Pouring Process for Cladding

田 中 拓^{*(1)}

Taku TANAKA

橋 本 光 生^{*(2)}

Mitsuo HASHIMOTO

小 家 隆 之^{*(3)}

Takayuki KOIE

大 友 清 司^{*(1)}

Seiji OTOMO

綾 垣 昌 俊^{*(4)}

Masatoshi AYAGAKI

井 上 剛^{*(5)}

Tsuyoshi INOUE

山 下 雅 之^{*(6)}

Masayuki YAMASHITA

抄 録

圧延作業は圧延用ロールを介して行われるため、製品と直接接触するロールの品質は製品品質ならびに操業性に直接影響をおよぼし、その性能の向上が強く望まれてきた。ロールの飛躍的な寿命向上を図る目的でCPC法によるハイスロールを開発した。新ロールの特徴及び得られた成果は次のように要約される。(1)硬質の晶出炭化物を利用した密な鑄造組織を有する。(2)漸進低周波誘導加熱焼入ならびに高温焼戻によりビッカース硬さ800以上の高硬度、温度上昇時の安定な組織及び低い残留応力により耐凹性ならびに耐き裂性が高い。(3)圧延操業に供した場合、表面粗度の低下は小さく、ロールバイト内での安定した摩擦係数を保持し、従来の5%クロム鍛鋼ロールに比し、3～5倍もの長時間大量連続圧延が可能である。(4)ロールの摩耗も極めて小さく、油圧延下での幅逆転操業が可能である。このように、本ロールは耐摩耗性、粗度保持性及び耐事故性において高い性能を発揮し、冷間圧延分野においてロール起因の制約条件を大幅に緩和するものである。生産性の向上に加え、ロール管理の簡略・省力化及び圧延操業のフレキシブル化、物流の効率化などが期待でき、その波及効果も大きい。

Abstract

Since strip rolling work is performed through the roll, the quality of a roll which contacts a product directly influences to product quality and productivity, and the improvement in the roll performance has been desired strongly. Authors developed the high speed steel roll manufactured by the CPC process (Continuous Pouring process for Cladding) in order to aim at fast improvement in a life of roll. The feature and the obtained result of the new roll are summarized as follows. (1) It has a fine casting microstructure with the hard eutectic carbide; (2) High hardness over 800HV, the stable structure at high temperature and low residual stress are achieved owing to the application of progressive low frequency induction hardening process and high temperature tempering. As a result, the resistance to roll marks and cracking in incident is improved; (3) When rolling operation is presented, the developed roll maintains the initial surface roughness much longer and holds the stable friction coefficient within a roll byte. The rolling campaigns has been greatly improved 3 to 5 times comparing to the conventional 5 mass% chromium forged steel roll; (4) Wear loss of a roll is also very small and the width inversion (schedule-free) operation in using oil lubricants is attained. Thus, this roll demonstrates a high performance in wear resistance, small fall of surface roughness, and the resistance to incident, and eases the restrictions conditions of a roll reason sharply in a cold rolling field. In addition to the improvement in productivity, a flexible rolling operation, the simplification and laborsaving of roll management, and the increase in efficiency of a physical distribution.

1. 緒 言

近年鉄鋼圧延分野においては、圧延製品の極薄化、寸法精度や表面性状の向上といった厳しい品質要求に応えつつ、経済的な操業を追求して発展してきた。とりわけ、1970年代後半以来、高機能圧延機が開発され、その導入により、品質、操業性が飛躍的に向上した。これに付随して、圧延製品と直接接触する圧延用ロールの品質

は製品品質ならびに操業性に直接影響を及ぼすため、その性能の向上が強く望まれてきた。

著者らは1988年に高炭素系高速度鋼材料(以下ハイス材と呼ぶ)を連続鑄掛け(CPC: Continuous Pouring process for Cladding)法により、鋼系芯材に鑄掛けた熱間圧延用複合ハイスロールを開発した^{1,2)}。本ロールは従来ロールに対し約5倍もの優れた耐摩耗性を発揮し、ホットストリップ仕上げ圧延機用として広く普及するとこ

^{*(1)} 日鉄ハイパーメタル株式会社 ロール製造部 マネジャー
北九州市戸畑区中原46-59 ☎804-8505 ☎093-872-7108

^{*(2)} 日鉄ハイパーメタル株式会社 部長技師 工博

^{*(3)} 日鉄ハイパーメタル株式会社 ロール製造部 グループリーダー

^{*(4)} プラント事業部 機械製造・素形材部 マネジャー

^{*(5)} 技術開発本部 鉄鋼研究所 圧延研究部 主任研究員

^{*(6)} 広畑製鉄所 鋳メッキ工場 マネジャー

ろとなった。その結果、ロール起因による圧延規制が大幅に緩和され、スケジュールフリー圧延の実現等その操作性の大幅な改善を達成するとともに圧延製品の品質向上に大きく貢献した。

一方、冷間圧延用ワークロールには金属組織の均質性と極めて高い硬度要求により、エレクトロスラグ再溶解(ESR: Electro-Slag Remelting)法による5 mass%(以下%と略す)クロム系の鍛鋼ロールが一般的に用いられている。熱間圧延分野同様、ロールの寿命向上に対するニーズは極めて強く、5%クロム系材料に合金を付与したESR法によるハイス系ロール等の新ロールが開発されてきたが、大きな改善を見るに至っていない。

そこで、著者らは冷間圧延分野においてもロールの飛躍的な寿命向上を図る目的でCPC法による冷間圧延用ハイスロールの開発に着手し、現在、実機適用までに至った。本報はその開発基本構想からロールの特性ならびにその実機適用結果について報告する。

2. 冷間圧延用ワークロールへのニーズ

冷間圧延プロセスの変化や新圧延機の導入など冷間圧延分野における環境変化によって、圧延ロールに対する品質要求も変化してきた。

冷間圧延プロセスにおいては1970年代前半にタンデムコールドミルの連続化が実現されて以来、酸洗工程あるいは連続焼鈍との連続処理ラインが導入され、生産性及び歩留の向上が図られた³⁾。連続化の普及にともないトップマーク、エンドマークといったロールきずの発生や板破断等の事故発生頻度が大きく低減された。また潤滑技術の向上により、異物の噛み込みによる凹きずの発生も抑制できるようになり、いわゆる圧延スケジュール中途でのロール臨時組み替え頻度が激減し、替わってロールの肌荒れや粗度の低下が圧延処理量を規制するようになり、ロールの耐摩耗性(粗度保持性)の向上による長時間連続圧延の実現がロールに要求されるようになってきた。

更に生産性を向上させるため強圧下圧延、高速圧延が行われるようになりロールに対する要求はより厳しさを増している。また、ユーザーニーズの多様化により、多品種化、小ロットが進む傾向にあり、熱間圧延分野同様スケジュールフリー圧延の実現を求める声も強くなってきている。

3. 開発の基本構想と品質設計

著者らは粗度保持性向上を主眼として、耐摩耗性に優れたハイス系材料と、その材料特性をち密な鑄造組織として生かすCPC法の組み合わせにより高性能冷間圧延用ロールの開発を目指した。表1に本開発ロールの基本設計の概要を従来ロールと比較して示す。以下、材質特性及び製造法について具体的に述べる。

3.1 材質特性⁴⁾

耐摩耗性を向上させるためCr, Mo, Vを添加した多元合金、いわゆるハイス系材料としMC及び M_6C 型の硬質炭化物を利用する。粗度保持性の向上を最大の特徴とし、前記硬質炭化物をち密な鑄造組織の結晶粒界に晶出させる。製品の表面性状確保のため耐凹性をもたせるため、押し込みキズに対する抵抗性の指標となるピッカース硬度で従来の5%クロム鍛鋼と同等の800HV以上を確保する。更に、使用中のスリップ事故遭遇時の局部加熱(573K程度⁵⁾)に伴う焼戻軟化によるき裂の発生を抑制するため、773K以上の高温焼戻を適用し、組織の安定化を図る。

表1 冷間圧延用CPCハイスロールの開発基本設計

ロール品種	CPCハイスロール	5%クロム鍛鋼ロール
外層材質	1%C-Cr, Mo, V	1%C-5%Cr
組織	炭化物	M_6C , MC
	基地	マルテンサイト
硬さ	800HV(HS90)≤	800HV(HS95)≤
結晶粒径	≤100μm	約400μm
適用製造(鑄造)法	CPC	ESR+鍛造
凝固速度	15~25mm/min	3~5mm/min
熱処理	焼入れ	漸進低周波誘導加熱
	焼戻し	773K≤ ≤473K

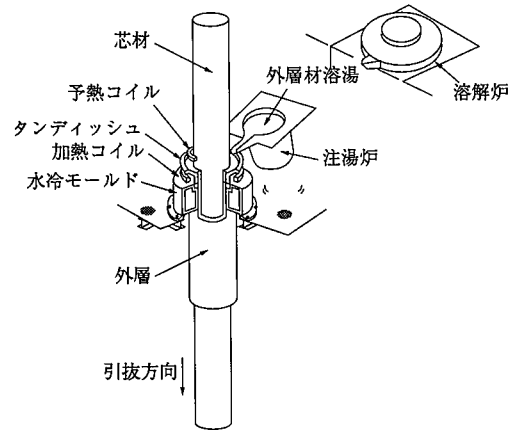


図1 連続鑄掛け(CPC)法概略図

3.2 CPC法の適用

ハイス系材料の鑄造において合金添加の制限が実質的になく、かつ凝固冷却速度が大きく、ち密な鑄造組織を得ることが可能なCPC法を採用し複合ロールとする。CPC法のプロセス概略図を図1に示す。本法は垂直に立てられた芯材と同心に配置された水冷モールドとの間隙に外層となる溶湯を供給し、芯材と溶着させながら順次凝固させ、断続的に下方に引き抜くことにより複合ロールを製造するものである。本法の特徴は次の4点である。

- 1) 偏析を生ずることなく、外層の高合金化が容易である。
- 2) CPC法はESR法に比べ3~5倍の大きな凝固冷却速度が可能であり、ち密な凝固組織が得られ、かつ表面から廃棄径深さまで組織の均一性が高い。
- 3) 凝固の方向が半径方向(ロール表面に対してほぼ垂直方向)に進むため、ESR製ロールに見られるような軸方向に延びた粗大なデンドライト模様が現れない。
- 4) 強靱でかつ剛性の高い鋼系芯材と外層ハイス材の組み合わせにより、強度向上のための鍛造工程が不要となり、ち密な鑄造組織が破壊されることなく維持される。

4. ロールの製造技術開発とその品質特性

直径583(廃棄径483)mm、胴長1 422mm、全長3 365mmの実機ロールをCPC法により製造した。開発ロールの外層ハイス材の組織的特徴を従来のESR製5%クロム鍛鋼及びESR製ハイス材と比較して図2に示す。硬質の共晶炭化物(写真では紐状の白い部分)が粒径100μm以下の微細な結晶粒の粒界に分布し、結晶粒内には粒状のMC炭化物が分散した鑄造組織を得た。同系のハイス材を従来のESR法にて製造した金属組織は鍛造により延伸され、400μm程度の大きな結晶粒と粗大な共晶炭化物が認められることと大きな対

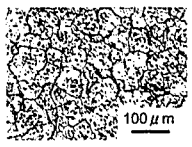
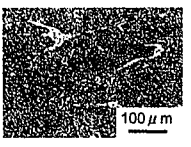
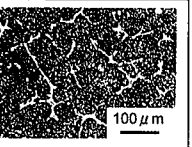
材質	5%クロム	ハイス	
製造法 (鑄造/鍛造)	エレクトロスラグ再溶解法 +鍛造	エレクトロスラグ再溶解法 +鍛造	連続鑄掛け (CPC) 法 (開発材)
基本成分 (mass%)	1%C-5%Cr	1%C-5%Cr-2%Mo-V, W	1%C-5%Cr-4%Mo-V
ミクロ組織			
炭化物の種類 及び面積率	M_7C_3 0.5%	M_7C_3 , MC 1%	M_7C_3 , MC 5%
硬さ	HS95 (800HV) ≤	HS95 (800HV) ≤	HS90 (800HV) ≤
表面残留応力	700-1 000N/mm ²	700-1 000N/mm ²	300-600N/mm ²

図2 開発ロール(CPCハイスロール)と従来ロールの材質比較

称を示す。

高合金化を図ることにより、耐摩耗性(粗度保持性)に寄与する炭化物量を面積率で5%と従来ロール材に比し飛躍的に増量させることができた。また研削性の阻害要因となる粗大な炭化物も認められず、優れた耐摩耗性と研削性とを兼ね備えている。表面残留応力は圧縮で300~600N/mm²であり、5%クロム鍛鋼ロールのもつ900N/mm²程度の残留応力に比べ、かなり低くなっている。耐スポーリング性にも優れているものと考ええる。

図3には切断面での硬度分布を示す。外層全域に目標としたピッカース硬さ800以上の高硬度、50mmの高深度を達成することができた。また、従来見られるような怪小域での硬度ドロップもなく、廃棄径まで安定した硬度を維持している点がもう一つの特徴である。新製時から廃棄にいたるまで、変わらぬ性能を発揮するものと考ええる。なお、ショア硬さではHS90に相当する。従来の5%クロム鍛鋼ロールのHS95に比し、見かけ上低い値を示す。これはショア硬さがロールの表面残留応力の影響を受けるためであり⁶⁾、本開発ロールの残留応力が低いことを反映している。

表2には開発材の機械的、熱的特性を示す。ヤング率、熱膨張係数とも従来の5%クロム鍛鋼ロールと大差なく、クラウン等ロールセット条件、圧延条件の変更は必要ない。また、図4は広畑製鐵所1TCM No.2スタンドでの圧延条件をベースに疲労損傷度を計算により求めたものである。疲労損傷度が1を超えると疲労破壊の可能性が出てくる。5%クロム鍛鋼の場合、現使用条件下で疲労損傷度1に近いところで使用されており、t/mmの飛躍的な向上(t/回の延長あるいは研削量の大幅な削減)は難しい。一方、開発ロールは耐疲労性に優れており、大量圧延にも十分耐えられることが分かる。疲労の蓄積が問題となる小径、高負荷ミルへの適用も可能と考えられる。

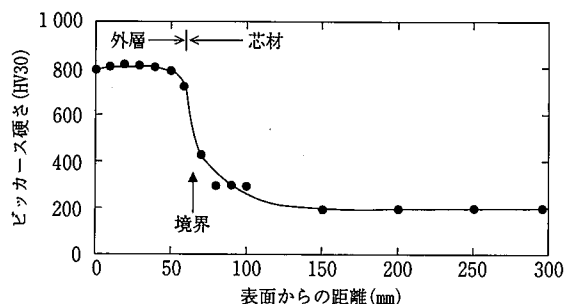


図3 開発ロールの断面硬度分布

表2 開発材の機械的、熱的性質

	5%クロム鍛鋼	CPCハイス	
		外層ハイス	内層SCM440
圧縮強度(N/mm ²)	3 000	3 500	-
引張強度(N/mm ²)	920	1 150	690
K_{IC} (N/mm ^{3/2})	600	800	-
弾性係数(N/mm ²)	214 000	215 000	213 000
転動疲労強度(N/mm ²)	2 300	2 600	-
熱膨張係数 at 375K/(K)	11.3×10^{-6}	14.3×10^{-6}	13.9×10^{-6}

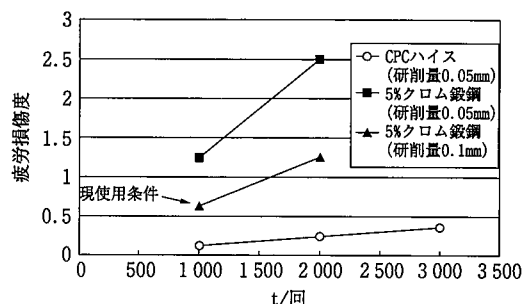


図4 CPCハイスロールと5%クロム鍛鋼ロールの疲労損傷度比較

5. 開発ロール材の性能評価⁴⁾

ハイス系鑄造材が冷間圧延用ロール材としての適用可否を調査するため、高速転動摩耗試験機を用いて基本的なトライボロジ特性、とくに耐摩耗性について評価した。また、摩耗試験後、SEM観察により鑄造ハイス材の摩耗状況を調査した。実験に使用したロール材は一般的に用いられている5%クロム鍛鋼と開発した鑄造ハイス材を用いた。いずれの材質も、初期表面粗度を二水準(ブライト、スクラッチ)にとって実験を行った。

図5は摩耗質量と転動回数との関係、図6は表面粗度保持率(初期粗度を100%とした)と転動回数との関係を示す。この結果から、5%クロム鍛鋼より鑄造ハイス材の方が粗度保持率(初期粗度を維持し続ける特性)が優れていること、初期粗度がブライト及びスクラッチ仕上相当のどちらの場合においても、5%クロム鍛鋼より鑄造ハイス材の方が耐摩耗性(質量変化及び表面粗度保持率の両方の評価指標)に優れていることが確認された。

図7は2万回転動後の摩擦面の摩耗状況の一例を示す。現行の5%クロム鍛鋼は粗度の低下に伴って筋状の凹凸部分(研削痕)が減少

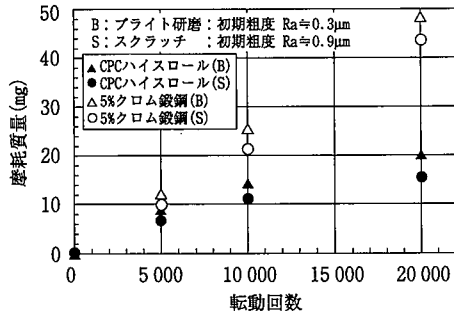


図5 冷間摩耗試験における摩耗減量

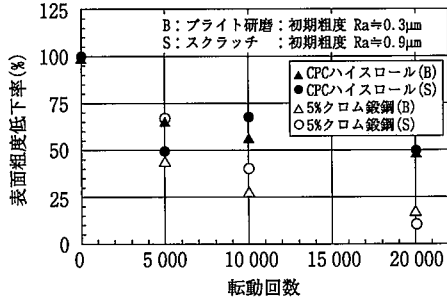


図6 冷間摩耗試験における粗度低下

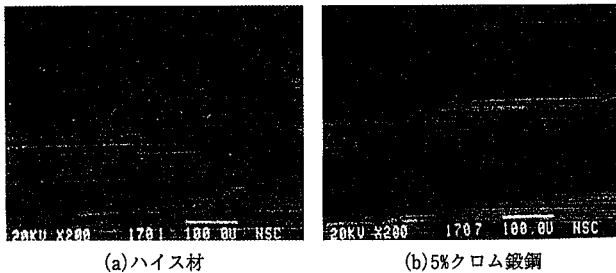


図7 冷間摩耗試験後の試験片表面SEM写真

し、平坦化していくのに対して、鋳造ハイス材は粗度の低下に伴って筋状の凹凸部分は減少するが、その減少量は小さく、かつ平坦化されたところに新たに凹みが形成されている。また、鋳造ハイス材に形成された凹みは、炭化物が脱落して形成されたものと考えられ、これが表面粗度保持率を維持する特性に寄与しているものと考えられる。

6. 実機圧延への適用結果

広畑製鐵所1TCM(ぶきき用5スタンドタンデムミル)にて開発ロールを実際の圧延作業に供して操作性及びロール表面の粗度保持性を調査した。なお、評価は従来ロールである5%クロム鍛鋼ロールとの比較で行った。

6.1 研削性

ロール研削はセラミック砥石を使用した。得られた研削肌を図8に示す。後段スタンドにも適用可能な美麗な研削肌が得られた。既に自動研削により従来の5%クロム鍛鋼ロールと同等の研削時間で仕上げる技術が確立されている。No.1スタンド組み込みロールにはショットダルにより初期粗度 $Ra1.2\mu m$ を付与した。ダル条件は従来の5%クロム鍛鋼ロールと同一条件で行い、変わらぬ表面肌を得ることができた。No.3スタンド組み込みロールは $Ra0.5\mu m$ の研削粗度を付与した。

なお、放電ダル試験も行い、従来の5%クロム鍛鋼ロールと同一条件で処理可能であることも確認できている。

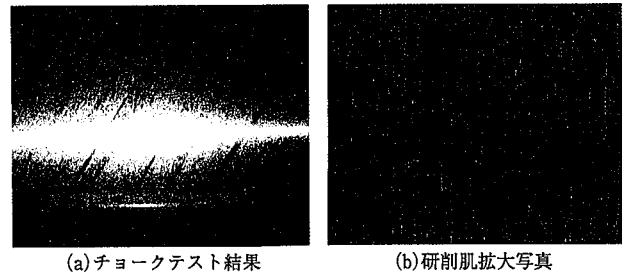


図8 CPCハイスロールの研削肌

6.2 圧延試験結果⁴⁾

6.2.1 粗度保持性

実機圧延試験はNo.1あるいはNo.3スタンドにCPCハイスロールを各々単独で組み込み、行った。

本ロールを用いて圧延操作を行った際の圧延操作性をNo.1スタンドでは先進率で、No.3スタンドではNo.2-3スタンド間張力を粗度保持性の指標にして評価した。結果をそれぞれ図9及び図10に示す。

No.1スタンドでの従来ロールの先進率は圧延とともに急激に低下し600t圧延した時点でロールを交換した。一方、本開発のCPCハイスロールの先進率は2400t圧延した時点でも高い先進率を確保し安定した圧延が可能であった。なお、途中2回、累積圧延トン数約1000t及び約1700tの時点において先進率が低下しているが、これは後方No.2スタンドに使用していた5%クロム鍛鋼ロールの粗度低下の影響を受けたもので、これを交換することにより回復した。No.3スタンドの張力も同様に従来ロールは圧延とともに急激に低下し早期にロールを交換せざるを得なかったが、本ロールは1700t圧延した時点でも十分高い張力を確保し安定した圧延が可能であった。

図11にはNo.1スタンドの使用前後でのロールの表面粗度の変化を示した。本ロールは大量に圧延しても表面粗度の低下は小さく、ある値に収斂する。これは組織がち密で結晶粒界に炭化物を有する鋳造組織が表面粗度の保持に有効に働いたものと考えられる。また、図12に示すように、大量圧延後も初期に付与した粗度がほぼそのまま維持されていることが圧延後のロール表面肌の顕微鏡観察により確認された。

6.2.2 耐事故性

操業技術の向上により、事故の発生頻度は激減しているものの、事故遭遇時の研削量増大はロール原単位を大きく悪化させるため、

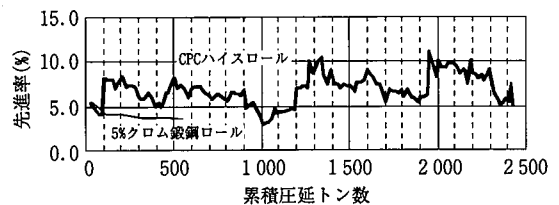


図9 No.1スタンドにおける先進率推移

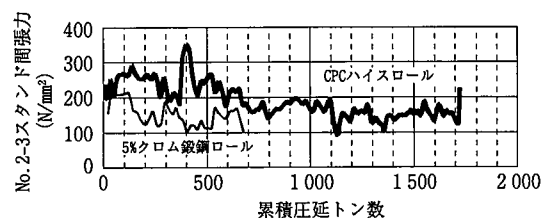


図10 No.3スタンド組み込み時のNo.2-3スタンド間張力推移

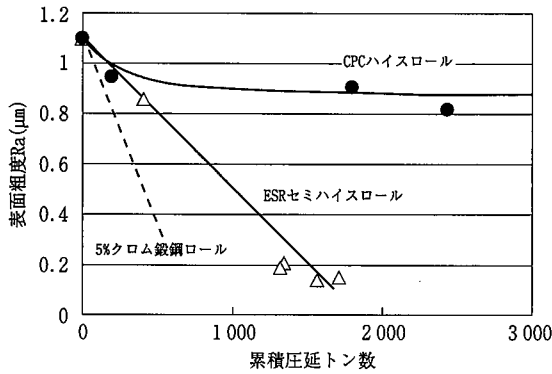


図11 No.1スタンド組み込み時のロール表面粗度変化

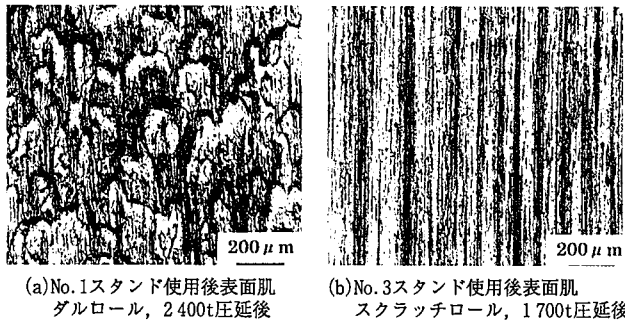


図12 圧延後ロール表面肌比較

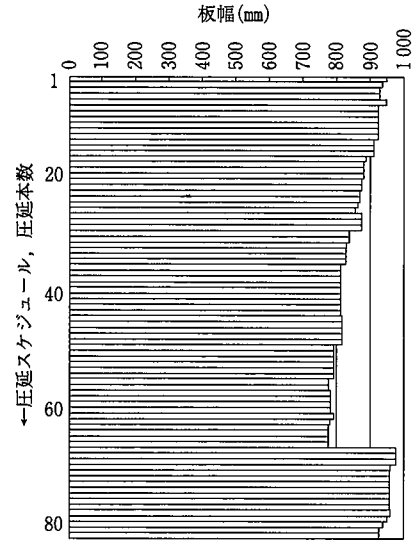


図14 板幅逆転テストにおける圧延スケジュール

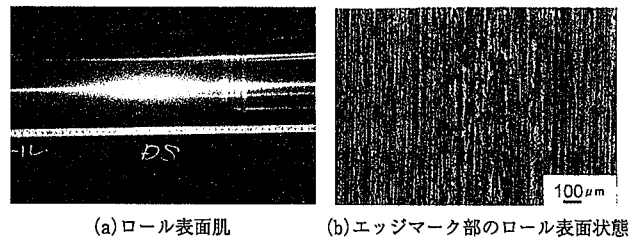


図15 板幅逆転テスト後のロール表面肌

耐事故性はロールに要求される重要な因子であることに変わりはない。実圧延での事故遭遇時の研削量を図13に示す。CPCハイスロールは事故遭遇時の研削量が極めて小さい。また、エッチングしても組織変化は認められず、高温焼戻を適用し、組織の安定化を図ったことにより耐事故性が大きく改善されていることが確認された。なお、クラックの検出は超音波探傷(表面波)により可能であり、従来の5%クロム鍛鋼ロールと同等のクラック管理で十分である。

6.3.3 幅逆転圧延テスト

冷間圧延においてはロール表面の通板端部が局部的に摩耗及び粗度低下し、これが鋼材へ転写されて製品の表面性状を損ねることより、通常は幅広材から幅狭材へ厳格に順番を決めて圧延を行っている。このことが生産性をしばしば阻害していた。そこで耐摩耗性に優れた本ロールを用いて幅狭材を圧延後に幅広材を圧延する幅逆転圧延テストを行った。図14に示す板幅推移の圧延チャンスにて本ロールをNo.3スタンドに組み込み、幅逆転を挟んで連続使用した。なお、他スタンドのロールは全て、幅逆転前に交換した。その結果、鋼材の表面を損ねることなく鋼材品質を確保することができた。

使用後のロール表面の外観及び鋼板端部の通板部顕微鏡写真を図15に示す。外観では板幅逆転後の鋼板の通板端部の形跡が認められるものの、板幅逆転前の幅狭材(780mm幅)の通板端部の形跡は全

く認められず、鋼板端部の通板部でのロール表面の損傷は極めて小さいと言える。また、鋼板端部の通板部顕微鏡写真においては軽微な付着物が認められるが、これは油膜切れ時に認められるものと同様の軽微な付着物であり、圧延材の品質への影響は無視できるものであった。今後、冷間圧延分野においてもスケジュールフリー圧延が実現する可能性を示すものとする。

7. 結言

CPC法によりハイス系材料を外層に採用した高性能冷間圧延用複合ロールを開発した。硬質の炭化物が多量に、かつ微細に分散した密な組織を実現したことにより、実圧延において従来の5%クロム鍛鋼ロールに比し、3~5倍もの極めて優れた粗度保持性を発揮した。幅逆転圧延試験にも成功し、冷間圧延分野においてもスケジュールフリー圧延実現の可能性が見出された。

また、その優れた粗度保持性を生かし、耐摩耗性確保のためクロムめっきロールが使用されているスタンドでのクロムめっきフリー化の可能性も期待できる。また、多量の炭化物分散による耐焼き付き性の改善効果も見込まれることから、高速、高負荷圧延やステンレス鋼圧延への適用評価も今後進めていきたい。

本開発ロールの適用により、ロール起因の制約条件が大幅に緩和され、生産性の向上に加え、ロール管理の簡略、省力化及び圧延操業のフレキシブル化、物流の効率化などが期待でき、その波及効果も大きいと考える。

参考文献

- 1) 橋本光生 ほか:製鉄研究, 338, 62 (1990)
- 2) 田中拓 ほか: 39th MWSP Conf. Proc, ISS, 35, 435 (1998)
- 3) 北浜正法:西山記念技術講座, 148-149回, 1993, p.165
- 4) 橋本光生 ほか: CAMP-ISIJ, 13, p.1065-1067 (2000)
- 5) 鎗田征雄 ほか:鉄と鋼, 67(14), 2152 (1981)
- 6) 古川満治 ほか:鉄と鋼, 65(4), 260 (1979)

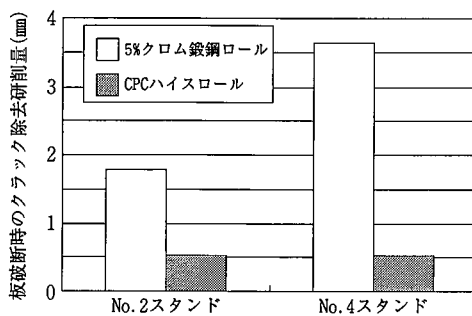


図13 板破断事故時の平均クラック除去研削量