遠心鋳造による熱間圧延仕上げミル用 ハイスロールの製造とその使用性能*

川崎製鉄技報 35 (2003) 1,44-48

Review of Principal Developments and Rolling Performance of Centrifugal Cast HSS Rolls for Hot Strip Mills







市野健司 Kenji Ichino 技術研究所 鋼管・鋳物研究部門 主任研究員(掛長)



 健司
 佐藤 克也

 Ichino
 Katsuya Sato

 新作
 水島製鉄所

 防研究部門
 熱間圧延部圧延技術室

 (掛長)
 主査(掛長)

要旨

川崎製鉄で開発された熱間圧延用ハイスロール製造技術の中から 以下の主要な技術をレビューした。(1) Nb 添加により VC を (Nb, V) C 複合炭化物にすることで遠心分離を抑制し,遠心鋳造を可能 にしたハイスロール製造技術の開発,(2) 共晶炭化物量を増量する ことで圧延荷重増大を抑制した熱間圧延仕上ミル前段用のハイスロ ールの開発,(3) M₇C₃ 型炭化物の強化に着目し,C,Cr,Mo 添加 量の適正化で耐肌荒れ性を改善したスーパーハイスロールの開発に ついて,それらの開発のキーテクノロジーを紹介した。さらに,ス ーパーハイスロールを仕上げ前段で使用し,その優れた耐肌荒れ性 及び耐摩耗性が確認され,従来ハイスロールの数倍のロール原単位 (t/mm) という卓越した使用性能が得られた。

Synopsis:

Kawasaki Steel has developed metallurgical technology of high speed tool steel (HSS) rolls for centrifugal casting. Principal developments were reviewed as follows: (1) It was found that the addition of Nb transforms VC into compound carbides (V, Nb) C of which specific gravity is similar to the residual molten steel. Consequently, centrifugal separation of VC carbide was prevented and the centrifugal casting process for roll manufacturing was applied the HSS roll. (2) The increase of rolling load when conventional HSS rolls was applied to former stands is prevented by the use of improved HSS where volume fraction of eutectic carbide is increased. (3) Super HSS roll which shows superior insistance to surface deterioration and wear resistance was developed by the toughening operation of M_7C_3 eutectic carbide enriched in C, Cr and Mo contents. The excellent performance of Super HSS roll was achieved in actual mills, accomplishing yield consumption (t/mm) several times superior to that of conventional HSS rolls.

1緒言

日本国内では大部分の熱間圧延ミルにおいて仕上ミル前段用ワー クロールにハイスロールが多用されており,後段スタンドにおいて も最終スタンドを除いてハイスロールの使用比率は非常に高い。と ころが,著者らの調査では,欧州における仕上ミル用のハイスロー ル普及率は非常に低く,北米においても一部のミルを除けばハイス ロールの採用検討または試用段階のミルが多い。この背景には,圧 延荷重が増大するなどの圧延操業トラブルや鋼板にスケール疵など の品質問題がおこりやすいというハイスロール特有の問題点があ る¹⁾。ハイスロールの導入には圧延設備の改善やロール使用技術の 変更をともなうことがあるため,容易にハイスロールを導入できな いためと思われる。川崎製鉄においては,ロール製造部門,研究部 門,熱間圧延部門が一体となってハイスロールの材料開発と使用技

術の開発がなされてきた。

本報告では,ハイスロールの製造および材質に関する主要な技術 開発についてレビューし,さらに,高性能ハイスロールの使用性能 について述べる。

2 MC 型炭化物偏析の防止

当初,熱間圧延仕上ミル用ハイスロールの製造には連続鋳掛け肉 盛り法(CPC法)と呼ばれる特殊な鋳造方法が適用されていた^{2.3)}。 当時,生産性が高くロール製造に多用されている遠心鋳造法では, 耐摩耗性向上に必須なMC型炭化物が偏析するという理由から, ハイスロールを製造することは困難であると考えられていた。遠心 鋳造によるMC型炭化物の偏析の一例として,高C-高V系高合金 鋼で円筒状のリングを遠心鋳造した時に生じた炭化物の偏析を Photo1に示す。リングの組成は2.5C-6Cr-5Mo-5W-6Vである。リ ングの外表面側はMo,W系の共晶炭化物で占められ,内表面側で はV系の粒状炭化物が密集している。このような偏析は遠心鋳造

Table 1 Density of carbides and elements





Photo 1 Typical example of segregation of carbide in a conventional centrifugal casting of alloyed steel



Fig. 1 Segregation mechanism of V carbide in inner layer of a high C-high V steel roll during centrifugal casting

された高 C - 高 V 系八イス系ロール材に特有に発生するもので,偏 析発生の仕組みを Fig. 1 の模式図に示すように,晶出した炭化物 が残溶鋼との比重の違いから溶鋼中を遠心分離の原理で移動するこ とによって偏析が生じると考えられている。各種炭化物および合金 元素金属の比重を Table 1 に示す。たとえば VC は溶鋼に比べて比 重が著しく小さいため,遠心力でリングの内表面側に遠心分離され て偏析したと推察される。すなわち,耐摩耗性を向上させる粒状の V 炭化物をロール使用層全域において均一に分布させたロールを遠 心鋳造で製造することは,極めて困難であると考えられた。

上述の難題を克服し,遠心鋳造法でハイス系ロールを製造可能と するための研究⁴⁻⁸⁾を進めた結果,以下の方法でハイス材の耐摩耗 性を損なうことなく遠心鋳造でも炭化物の偏析が防止できることを 発見した。(1) Nb を適正量添加することで初晶 VC を (V, Nb) C 複 合炭化物にし,炭化物の形態をほとんど変化させずに比重を溶鋼に 近い 6.5~7.0 まで増大させる。(2) 残溶湯の比重を高めて偏析を助 長する Mo および W の添加を限定する。ここで,W はハイスロー ル材を構成する重要な元素の一つと考えられていたが,芯材に球状 黒鉛鋳鉄を配した複合ロールに適用可能な条件を考慮した熱処理を 実施した場合,V の添加は耐摩耗性を著しく向上させるが,V 添加 のもとでの W 添加の効果は小さく,適切な化学組成のもとでは W 添加は重要でないことが明らかになった。

以上の炭化物偏析対策を考慮した成分設計と熱処理の適正化を実施することで,遠心鋳造によるハイスロールの製造が可能となった。

3 仕上前段用ハイスロールの圧延荷重増大抑制

開発当初のハイスロールを熱間圧延仕上ミル前段スタンドで使用

MC type carbide Eutectic carbide Roll Strip (a) Conventional HSS (High friction) Roll Strip (b) Improved HSS (Low friction)

Fig. 2 Illustration of the cross section in the interface between strip and roll

した場合,従来の高クロム鋳鉄ロールに比べて,圧延荷重が2~3割 増大した。その結果,ミルの圧下が制限される,あるいは鋼板のス ケール疵が誘発されるなどの問題が発生した。

実圧延をシミュレートした熱間すべり摩耗試験機[®]を用い,実験 後の試験片の表面を観察すると,従来の高クロム鋳鉄ロールに比べ てハイスロールでは凹凸のある摩耗表面を呈していた。このミクロ 的な凹凸はハイスロールを特徴付ける粒状の MC 型炭化物が突起 状に表面に存在するために形成されることが明らかになった。した がって,ロール表面では,MC 型炭化物の突起がロール表面と圧延 材との摩擦係数を増大させ,圧延荷重が増大したと推察された。

ロール摩耗面を平滑化すれば圧延荷重の低減が期待される。著者 らは MC 型炭化物を取り囲む共晶炭化物に着目した研究を行っ た¹⁰⁻¹²。その結果,C,Cr,Mo をパランス良く増量させることで, 摩耗面が平滑になることが見出された。その原理を模式的に Fig. 2 に示す。強化された M₇C₃ 型炭化物を主体とする硬質な共晶炭化物 が増量し,MC 炭化物の突出を抑制すると考えられた。

このようにして開発された圧延荷重低減型ハイスロール (HSS-2) は,仕上ミル前段スタンドにおいて従来の高クロム鋳鉄ロールと同 等にまで圧延荷重が低減し,耐摩耗性は初期のハイスロール (HSS-1)よりも優れていることが分かった。圧延荷重の問題に対し,ロ ール冷却,ロール潤滑などのロール使用技術の改善の効果も加わり, 熱間圧延仕上ミル前段スタンドにおいては圧延荷重低減型ハイスロ ール (HSS-2)が使用されるようになった。

4 耐肌荒れ性に優れたハイスロール材の開発

熱間圧延仕上ミル前段スタンド用ワークロールの耐肌荒れ性は, 耐摩耗性と同様に重要な要求項目である。耐肌荒れ性を飛躍的に向 上させたハイスロール(スーパーハイスロール)の開発⁽³⁾について 述べる。

4.1 開発の考え方

前段スタンドのワークロール表面には圧延使用中にヒートクラッ クが発生する。ヒートクラックはロール表面に対して垂直に生成す るが,ロール表層下には繰り返される圧延負荷によって表面に平行 に近い疲労クラックが生成する。圧延条件が過酷な場合あるいはロ ールを長時間連続使用すると疲労クラックが伝播していき,損傷が 大きい部分からロール表層部が脱落することで肌荒れが進行すると 考えられる。

使用後のロール表層の断面を観察した一例を Photo 2 に示す。 クラックは炭化物 (Photo 2 では塊状で濃い灰色を呈する)の存在 する部分を選択的に通過している。その炭化物のほとんどはその形

45



Photo 2 Path line of cracks observed on the cross section in a roll surface



Fig. 3 Effect of additional elements on wear loss in the hot wear test of HSS material

態から M_7C_3 型炭化物である。前述したように,荷重低減効果を得るために増量された M_7C_3 型炭化物は,ハイスロールの優れた耐摩耗性に寄与する粒状の MC 型炭化物に比べて硬さは低い。そこで, 著者らは,疲労クラックの経路となる M_7C_3 型炭化物を強化することで,クラックの進展を抑制し肌荒れの発生を防止できると考えた。

4.2 耐クラック性の改善

M₇C₃ 型炭化物の主な形成元素は Fe, Cr, Mo およびCである。 そこで, C, Cr, Mo の含有量を種々変化させた時のハイスロール 材の耐摩耗性を熱間すべり摩耗試験で調べた。ハイスロールの基本 組成の一つである 2C-6Cr-2.5Mo 材を基準とし,耐摩耗性に及ぼす C, Cr および Mo 添加量と炭化物量の影響を Fig. 3 に示す。基準 組成に対し C だけを増量させたグループ (a) および C と Cr とを同 時に増量させたグループ (b) においては,炭化物量が増大している にもかかわらず摩耗量は同等または増大しており,耐摩耗性の向上 は期待できない。しかし,基準組成に C, Cr, Mo を同時に増量さ せたグループ (c) では,炭化物の増量にしたがって耐摩耗性の改善 が期待されることが分かった。

上述のグループ (a), (b), (c) の摩耗表面の観察例を Photo 3 に 示す。グループ (a), (b) では M_7C_3 型炭化物に発生したクラックが 多く観察されたが, グループ (c) ではクラックは激減していた。こ のことは, Cr, Mo の増量によって, M_7C_3 型炭化物の耐クラック 性が改善されることを示唆している。Fig. 4 に M_7C_3 型炭化物を構 成する主要元素の組成に及ぼす Cr および Mo 添加量の影響を示す。 Cr だけを増量した場合には M_7C_3 型炭化物中の Mo 濃度は減少する のに対し, Cr と Mo を増量するとその両方が M_7C_3 型炭化物に濃縮 されており, M_7C_3 型炭化物の特性が改善されたことと対応する。



(a) Base material (2.2C-6Cr-2.5Mo-5V-1.5Nb)
(b) Increase in C content
(c) Increase in Cr and Mo contents

Photo 3 SEM images of worn surface of hot wear test disks



Fig. 4 Effect of Cr and Mo content on chemical composition of eutectic carbide

したがって、M₇C₃ 型炭化物の強化には C, Cr, Mo の各々を適 切に増量することが有効であることが明らかになった。炭化物の強 化と同時に炭化物量も増大することから、ロールの耐肌荒れ性およ び耐磨耗性の改善が期待される。また、圧延荷重低減型ハイスロー ルの開発で述べたように、M₇C₃ 型炭化物の増量は圧延荷重増大を さらに抑制する効果も期待される。以上の研究結果に基づき C, Cr, Mo 量をバランス良く増量させた高性能ハイスロール(スーパーハ イスロールと呼ぶ, Super HSS)を開発した。このスーパーハイス ロールは、仕上ミル前段スタンド用ロールとして、先に開発された 圧延荷重低減型ハイスロールに置き換わって多用されている。

5 ハイスロールの使用性能

5.1 ハイスロール材の適用

開発された種々のハイスロール材は各々の特性を考慮して棒網ミ ル,造管ミルなどにも適用され¹⁴⁾,優れた性能を発揮しているが, 主要な用途は熱間圧延仕上ミル用ワークロールである。熱間圧延仕 上ミル用に製造しているハイスロールの材質は,(1)後段用ハイス ロール(HSS-1),(2)圧延荷重低減型ハイスロール(HSS-2),(3) 前段用高性能ハイスロール(Super HSS)に大別される。それらのミ クロ組織の例を Photo 4 に示す。MC型炭化物および M₇C₃型の共 晶炭化物の形態は,各々の用途に応じて最適化されている。たとえ ば,後段用に使用される HSS-1 は耐事故性が重視されるため共晶 炭化物量が少なく,逆に,前段用の HSS-2 や Super HSS は先述し た圧延荷重増大抑制の目的で共晶炭化物量が増量されている。

5.2 スーパーハイスロールの使用性能

高性能ハイスロールとして開発されたスーパーハイスロールの熱 間圧延仕上前段での使用成績を紹介する。F1 スタンドで使用した





Photo 5 Comparison of damage on roll surface after usage



Fig. 5 Relation between rolling amount and the depth of heat crack in HSS rolls

後のロール表面の観察例を Photo 5 に示す。比較材として示す HSS-2 ハイスロールにはロール表層直下に無数のピット(微小欠け 落ち)が発生しているのに対して,スーパーハイスロールは HSS-2 ハイスロールの2 倍の8600tを圧延しているにもかかわらず,ロ ール表層のダメージは非常に小さいことが分かる。次に,圧延使用 後のロール表層に生成したヒートクラックの深さ(超音波で検出さ れる研削すべき損傷域深さ)と圧延量との関係を Fig.5 に示す。 圧延量に比例してヒートクラックは深くなる傾向がある。グラフの 勾配が小さいほど耐肌荒れ性に優れることを示している。HSS-2 ハ イスロールが圧延量7000t で約400 µm 深さのクラックが生成して



Fig. 6 Comparison of barrel profile on Super HSS roll and conventional HSS-2 roll



Fig. 7 Effect of the rolling weight on the roll performance

いるのに対し,スーパーハイスロールでは 25000t を圧延してもク ラックの深さは 100µm 以下であり,HSS-2 ハイスロールよりもロ ール表層の損傷が極めて小さいことが分かる。また,同時期にテス トした CPC ハイスロールとスーパーハイスロールとでは損傷の程 度は同等である。

圧延使用前後のロールの軸方向プロフィルを Fig. 6 に示す。圧 延使用前後のプロフィルの差から摩耗量を読むことができる。従来 のハイスロールの2 倍近い量を圧延しているにもかかわらず,スー パーハイスロールは HSS-2 ハイスロールの約半分の摩耗量であり, 耐摩耗性が極めて優れていることを示している。さらに,HSS-2 ハ イスロールでは,圧延使用後のプロフィルの局部的な凹凸が大きい のに対し,スーパーハイスロールの摩耗部は非常に滑らかである。 これは,上述したスーパーハイスロールの優れた耐肌荒れ性と対応 するものである。

耐摩耗性の指標としてロール原単位:積算圧延重量/ロール消費 径 (t/mm)を用い,事故研削を除いた月間平均ロール原単位 (t/mm)と研削1回当たりに圧延した平均重量(ここでは圧延単位重 量と呼ぶ)(t/trips)との関係を Fig. 7 に示す。ロール原単位 (t/mm)は圧延単位重量(t/trips)に比例して直線的に増大する傾向 が認められ,圧延単位重量(t/trips)を拡大しても研削量はほぼ一定 であることを示している。スーパーハイスロールの耐肌荒れ性およ び耐摩耗性が優れているため,圧延単位重量(t/trips)を増加でき, 研削量の増大も抑制されている。従来の遠心鋳造ハイスロールの耐 摩耗性は 10 000 t/mm 前後であり,圧延単位重量 (t/trips) が小さい 場合はスーパーハイスロールの耐摩耗性は従来ハイスロールと同等 である。しかし,スーパーハイスロールの圧延単位重量 (t/trips) を 増大させた場合には,従来ハイスロールの数倍の耐摩耗性が得られ た。さらに,スーパーハイスロールを CPC ロールと比較しても同 等の卓越した耐摩耗性が示された。

以上のように, M₇C₃ 型共晶炭化物を強化して開発されたスーパ ーハイスロールは, 圧延使用時のロール表層の損傷が小さく, その 結果,耐肌荒れ性および耐摩耗性が著しく改善され,優れた使用性 能が得られることが分かった。

6 結 言

生産性に優れた遠心鋳造法による熱間圧延仕上ミル用ハイスロー ルの製造技術および材料開発をレビューし,さらに,スーパーハイ スロールの卓越した使用性能について述べた。

M₇C₃型共晶炭化物を強化して開発されたスーパーハイスロール を圧延に使用し,優れた耐肌荒れ性および耐摩耗性が示された。従 来ハイスロールの数倍のロール原単位(t/mm)が得られ,スーパー ハイスロールでは卓越した使用性能が得られることが分かった。

- 参考文献
- 1) **縄田良作,杉村幸彦,佐野義一:塑性と加工,36**(1995)417,1128
- 2) 佐野義一,村上文男,大島昌彦,服部敏幸,大畑拓巳:日立金属技報,4(1988),91
- 橋本光夫,大友清司,吉田幸一郎,倉橋隆朗:製鉄研究,(1990)338, 62
- 4) 片岡義弘, 天野虔一, 上田修三: CAMP-ISIJ, 6(1993)2, 509
- 5) 片岡義弘,天野虔一,金成昌平,湯田浩二,宮井直道,新中博昌: *CAMP-ISIJ*,6(1993)2,510
- 6) 湯田浩二,宮井直道,新中博昌,片岡義弘,金成昌平,佐藤隆三: *CAMP-ISIJ*,6(1993)2,511
- 7) 片岡義弘,天野虔一,上田修三,宮井直道,新中博昌:金属学会会報,32(1993)4,223,(日本金属学会技術開発賞受賞)

- 8) 小関智也,片岡義弘,澤 義孝,市野健司,天野虔一,宮井直道: 日本鉄鋼協会圧延ロール研究部会報告書,(1995),67-74
- 9) 野口 紘,渡辺靖夫:川崎製鉄技報,19(1987)3,195
- 10) 市野健司,片岡義弘,湯田浩二:川崎製鉄技報,28(1996)2,89
- 11) 市野健司,小関智也,豊岡高明,橋本忠夫,湯田浩二:材料とプロ セス,9(1996),1018
- 12) 小関智也,市野健司,中野善文,橋本忠夫:材料とプロセス,10 (1997),349
- 13) 市野健司,小関智也,豊岡高明,平岡久,片岡義弘:まてりあ, 39(2000)2,181,(日本金属学会技術開発賞受賞)
- 14) 金山太郎,依藤 章,瀬尾省逸,松岡 聡: CAMP-ISIJ, 14(2001), 455