

技術報告

ホットストリップミル用のワークロールについて*

河原英磨**

Work Rolls in Hot Strip Mills

Hidemaro KAWAHARA

Synopsis:

The work roll materials in hot strip mills and the damages of rolls which arise in rolling operation are discussed in this paper.

As for the rolls in stands of the first half of a roughing mill train, wear and heat cracking are most important problems. The double-poured hard cast steel rolls give excellent rolling performances in these stands. As scale banding and surface deterioration of the rolls are main troubles in stands of second half of the roughing train and in stands of the first half of finishing train, new adamite rolls with fine metallic structures give good results. Wear of roll surface, cracks, and surface spallings due to the rolling of cobbled sheet are main roll damages in the stands of the second half of the finishing train. In order to prevent these damages, new double-poured alloyed grain rolls made by centrifugal casting method are used for these stands.

(Received Nov. 30, 1970)

1. 緒言

本邦の製鉄業は最近 20 年間に長足の進歩をとげ、現在は世界有数の製鉄国として世界の注目を集めている。ことに熱間ストリップ圧延機は質量ともに世界の先端を進んでおり、これらのミルによつて圧延された熱延コイルは海外各地に輸出されて、品質の面でも高く評価されている。鋼材圧延用のロールは鉄鋼業の必需品であり、その良否は圧延鋼材の品質に直接影響をおよぼすものとして重大な関心が払われている。海外技術の模倣から出発した本邦のロール製造技術は、すでに 60 有余年の歴史を持ち、鉄鋼業の進歩発展に呼応して品質の改善と新製品の開発が進められ、陰の力として鉄鋼業の発展に寄与している。現在は海外技術の模倣から完全に脱却して日本独特のすぐれた技術が開発され、世界の一流品として海外でも好評を博している。熱間ストリップ圧延機用のロールも圧延業界の要望に沿つて今日まで品質の改善と新材質の開発がちくじ行なわれてきたが、ますます厳しくなる圧延条件にたえるロールの開発をめざして現在もなお研究が続けられている。ここでは熱間ストリップ圧延機に今まで使用されてきた各種のロール材質について概説するとともに、現在広く使用されているロールの

問題点とその対策について述べる。

2. 粗圧延機用ワークロール

熱間ストリップ圧延機は 1 基の逆転式粗圧延機と一連の仕上げ連続圧延機から構成された半連続式のもの、数基の粗圧延機を有する全連続式のものがあるが、最近では圧延能力を高めるために主として全連続式の圧延機構成が設置されている。連続式の粗圧延設備は一般に 1～2 基の 2 重圧延機(前段)と 3～4 基の 4 重圧延機(後段)から構成されており、前段と後段ではワークロールに要求される諸性質がいくぶん違うので、異質のロールが使用されている。

2.1 粗前段スタンド用ロール

粗前段用のロールはスラブ分塊ロールに近い条件で使用されるから、強度と耐摩耗性およびヒートクラックに対する抵抗性を必要とする。ことにヒートクラックの交点が欠け落ちてピットを発生すると製品コイルにへげ疵を生ずるおそれがあるので、ヒートクラックの軽減は重要な問題である。当初は分塊ロールと同様に C 0.8～1.2

* 昭和45年11月30日受付

** 日立金属(株)若松工場 工博



Photo. 1. Scale banding in roughing mill work roll.

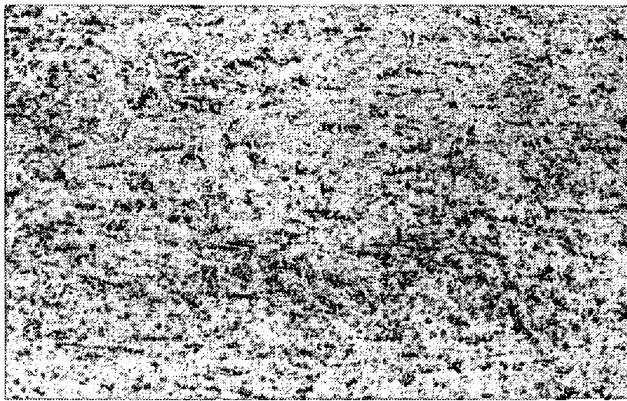


Photo. 2. Etched micro-structure of alloyed grain iron roll.

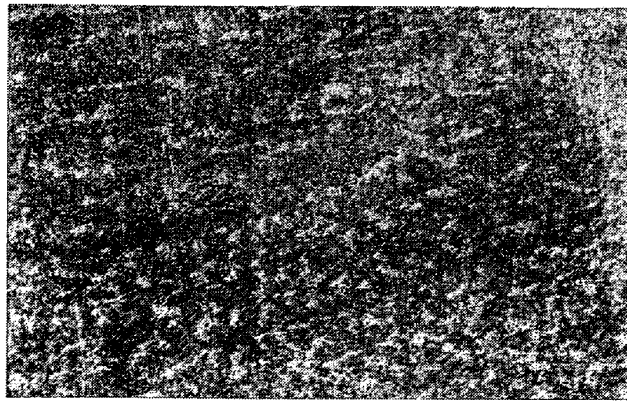


Photo. 3. Etched micro-structure of adamite roll.

%, Cr0.8~1.2%, 硬度 Hs 35~42 の特殊鋳鋼ロールが使用されていたが、そのごヒートクラックを軽減する目的で C1.2~1.4%, Cr0.4~0.8%, 硬度 Hs 34~38 の黒鉛鋼ロールが使用され、ヒートクラック軽減の目的はある程度達成された。しかし耐摩耗性は特殊鋳鋼ロールと大差なく、しかもヒートクラック交点の小さい欠け落ちが発生するため顕著な圧延成績の向上は認められなかった。最近合金鋳鋼系の複合ロールが開発されて、熱間ストリップ圧延機の粗前段スタンドのみならず分塊圧

延にも試用されている。このロールは鋳鉄の中抜きロールと同様にロール外殻層と芯部が異質の材質で構成されており、その境界部は完全に溶け合つて不連続点のないものである。外殻層は合金鋳鋼、芯部は強靱な低炭素鋼で、焼入れ焼もどしによつて表面硬度は Hs 50~60 に調整されている。このロールは従来のロールより耐摩耗性に富むのみならず、ヒートクラックも軽微になるので、従来の 1.5~2 倍の好成績をおさめている。しかし材料の噛込みが従来よりいくぶん悪くなるのが一つの欠点である。

2.2 粗後段スタンド用ロール

連続式粗圧延機後段のワークロールならびに逆転式粗圧延機のワークロールはバックアップロールによつて補強されているので、その強度はほとんど問題にならない。このロールでは表面の肌荒れが最大の問題であり、軸方向のヒートクラックが肌荒れの基点になるので、クラックの軽減もまた重要な問題である。Photo. 1 は粗ワークロールに発生した肌荒れ（スケールバンディング）の状況を示したものである。そのほか摩耗、押疵、噛込み不良、スリップなどが問題になることがある。

約 10 年前まで中抜き鋳造法で作られた合金グレーンロールが使用されていたが、肌荒れが比較的早期に発生するので、試験的に合金ダクタイルロールが使用されたことがある。しかし合金ダクタイルロールも肌荒れ改善の効果が少なく、被圧延材のスリップについてはむしろ劣化する傾向がうかがわれたため、広く用いられるにいたらず現在は一部の圧延機を除きほとんどすべてアダマイトロールが作用されている。Table 1 に粗圧延機のワークロールとして使用されている中抜き合金グレーンロールとアダマイトロールの化学成分と硬度を示し、Photo. 2, 3 はその顕微鏡組織を示す。また某製鉄所の逆転式粗圧延機でほぼ同一時期に使用された上記 3 種類のロールの圧延成績を Fig. 1 に示す。

粗圧延機後段用のワークロールにも最近複合鋳鋼系のロールが試用されつつあるが、ここでは摩耗よりも肌荒れが重視されるため、かならずしも高硬度のロールが好成績を示すものではなく、長時間の圧延に耐えて美しい肌を保つロールの開発が熱望されている。粗ワークロールの肌荒れは仕上げ前段スタンド用ロールのそれと類似しており、肌荒れの発生機構もほぼ同様なものと考えられるので、詳細は次節でまとめて述べることにする。

3. 仕上げ圧延機用ワークロール

熱間ストリップ圧延機の仕上げ圧延機は一般に 4~7 スタンドから構成されている。最近では薄板を高精度で圧

Table 1. Chemical composition and hardness of roughing work roll material.

Roll material	C%	Si%	Mn%	Ni%	Cr%	Mo%	Hs
Alloyed grain	3.0~3.3	0.7~1.0	0.3~0.6	3.0~4.0	1.3~1.7	0.3	63~73
Adamite	1.4~1.8	0.2~0.6	0.8~1.2	—	0.8~1.2	0.3	40~50

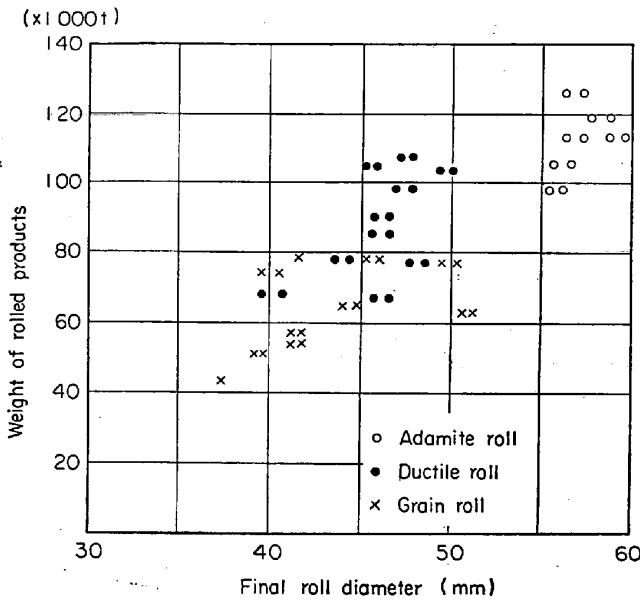


Fig. 1. Performance of the three kinds of roll used in reverse roughing mills.

延するために7スタンドの圧延機が設置されつつあるが、ここでは現在最も広く使用されている6スタンド圧延機を対象にして、これに使用されるワークロールの材質や使用上の問題点およびその対策などについて述べる。各スタンドに使用されたロールの摩耗形状の調査測定は各所で行なわれており、その結果はほとんど類似したものである²⁾。すなわち、最初の2スタンド(F₁, F₂)に使用されたロールはほとんど摩耗しておらず、最も摩耗がはげしいのは第4, 第5スタンド(F₄, F₅)のロールである。最終スタンド(F₆)では一般に圧下が軽いので、F₄, F₅より摩耗量が少ないことはうなずけるが、最も圧下量の多いF₁, F₂でほとんど摩耗しないのはふしぎである。この件についてTAFELはつぎのように説明している³⁾。すなわちF₁, F₂スタンドでは圧延摩擦力が被圧延材の剪断強度より大きくなるため固着圧延(sticking)の条件を満たしており、ロール表面と被圧延材間の滑りがないからロールはほとんど摩耗しないが、F₃以降では摩擦力が材料の剪断強度より小さくなり滑り圧延(slipping)の条件になるのでロールが摩耗すると説明している。圧延後のロール肌を観察すると、F₁, F₂ロールは一般に光沢のある黒皮スケールでおおわれているのに対し、F₄以降のロールは摩耗した金属肌を呈しており、

両者間に明らかな差異を認めることができる。従来は新品ロールをまずF₆に使用しロール径が小さくなるにしたがつてF₅, F₄と順次降ろしてゆき、最後にF₁, F₂に使用して廃却するケースが多かった。しかし上に述べたようにF₁, F₂とF₄~F₆ではロールの使用条件がいくぶん違うので、現在は6スタンドを前段と後段に分けて、前段スタンド(F₁, F₂)と後段スタンド(F₄~F₆)には別種のロールが使用されている。F₃スタンドは前段と後段の中間に位置しているのでいずれのロール材質も使用可能であり、両者が混用されている場合もある。

3.1 仕上げ前段スタンド用ロール

仕上げ前段スタンド(F₁, F₂)のワークロールには、1960年ころまで仕上げ後段に使用して直径が小さくなった中抜き高合金グレーンロールが使用されていた。高合金グレーンロールは白鉄組織中に微細な片状黒鉛が散在し、ロール表面から内部に向かって黒鉛の粒径粒数がしだいに増加している。したがって初径時の硬度はHs76~82であるが、直径が小さくなつて前段スタンドに使用されるころには硬度がHs70~76に低下しており、組織もいくぶん粗大化している。このようなロールをF₁, F₂スタンドに使用すると、比較的早期にPhoto.4, およびPhoto.5に示すような流星状の疵やスケールバンデングを発生してロール肌ざらざらに荒れてくるため、ロールの途中組替えが必要になる。この欠点を軽減するため径小ロールのF₁, F₂転用をやめてF₁, F₂用ロールを専用化し、Hs70~75の合金グレーンロールや合金ダクタイルロールを使用する試みも行なわれたが、大幅な改善効果をあげることはできなかつた。これらのロールの他の一つの欠点は被圧延材を噛みどめした場合に深いヒートクラックを発生して改削後もクラックが残り、以後の使用に際して肌荒れの基点になることである。Photo.6は噛みどめクラックから発生したスケールバンデングの状況を示したものである。流星疵やスケールバンデングが発生する理由については種々の説があり⁴⁾、その代表的なものを下に列記する。

1) ヒートクラック説⁵⁾

ロール表面は繰返し加熱冷却をうけて亀甲状の細かいヒートクラックを発生し、このクラックに被圧延材のスケールが押しこまれる。押しこまれた硬くてもろいスケ

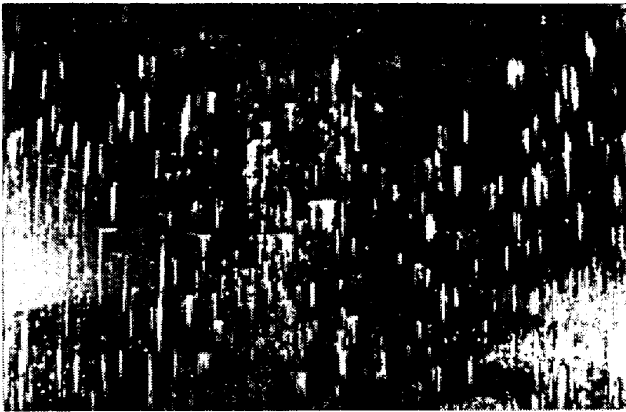


Photo. 4. Comet tail scale peeling at the roll surface in early stand of finishing train.

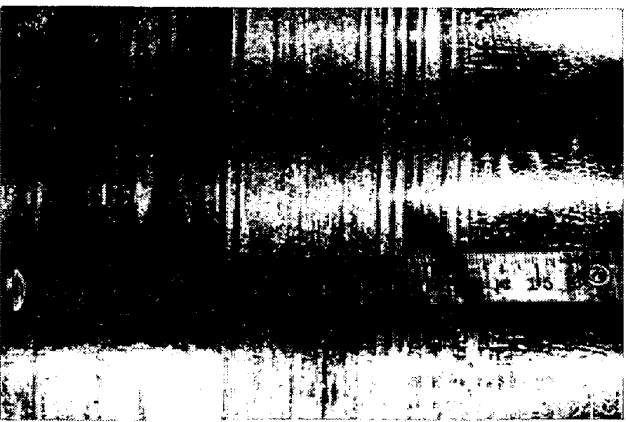


Photo. 5. Scale banding at the roll surface in early stand of finishing train.



Photo. 6. Scale banding resulting from deep heat checks.

ールが脱落する際にクラックの周辺をかきむしつて流星疵やスケールバンデングを発生する。

2) 黒鉛脱落説⁷⁾

グレーンロールやダクタイルロールの表面には無数の微細な黒鉛が存在するが、圧延中にこれらの黒鉛が脱落してピットを形成し、ここにスケールが押しこまれてヒートクラック説と同様な経過でロール表面の肌荒れが進

行する。

3) スケールによる擦りはぎ説⁶⁾

被圧延鋼材の表面は常に酸化雰囲気であり、900°C以上では硬いマグネタイト (Fe_3O_4) が発生するので、 F_1 、 F_2 スタンドではこの硬いさびによつてロール表面が擦られて肌荒れを発生する。

4) ロール表面の薄層剝離説⁸⁾

ロール表面には表面に垂直なヒートクラックが発生するが、これとは別に表面に平行なクラックが表面直下に発生し、このクラックが進展してロール表面の薄い層が剝離し肌荒れを起こす。表面に平行なクラックが発生する原因については熱疲労説やバックアップロールとの強圧説、ロールと被圧延材間のスリップによる剪断応力説などがある。

5) その他の説⁹⁾

電気化学的腐食説や圧延にともなう剪断応力説などがある。

合金グレーンロールは組織中に微細な黒鉛粒が分散しているとともに多量のセメントイトも存在し、熱衝撃に弱いのみならず脆い組織であるから、上記の諸説はいずれも否定しがたく、これらの組み合わせによつてロール表面の肌荒れが発生進行している可能性がある。また高合金グレーンロールは一般に片状黒鉛鑄鉄によつて中抜きを行なっているから、ウォブラー部の強度が弱く、駆動力の大きい圧延機ではウォブラー欠損の危険性をはらんでいる。合金グレーンロールのこれらの欠点を改善するため 1955 年頃から特殊鑄鋼やアダマイト系のロールが試用されるようになり¹⁰⁾、ちくじ材質の改善が行なわれて現在は国内のほとんどすべての仕上げ前段圧延機に炭素含有量 1.4~1.8% のアダマイトロールが使用されている。合金グレーンロールは一定量のコイルを圧延すると急激にロール肌が悪化するのに反し、アダマイトロールは圧延の進行とともに徐々に肌荒れが進行し、合金グレーンロールに比較して長時間の使用に耐えるといわれている。しかし圧延能率を上げるためにはロール組替え回数を減らすことが一つの有力な手段であるからアダマイトロールに対する圧延肌改善の要求はますますきびしさを加えている。

F_1 、 F_2 スタンドに使用されたアダマイトロールの表面は一般に光沢のある薄い黒皮スケール (Fe_3O_4) でおおわれているが、薄いコイルの圧延や特殊鋼の圧延など圧延条件が苛酷になると合金グレーンロールと同様にロール表面をおおっていた黒皮が部分的に剝離して流星状の疵やスケールバンデングを発生する。ロールの表面にこのような肌荒れが発生すると、製品コイルの表面にも特異



Photo. 7. Comet tail scale peeling caused by thermal fatigue cracks.

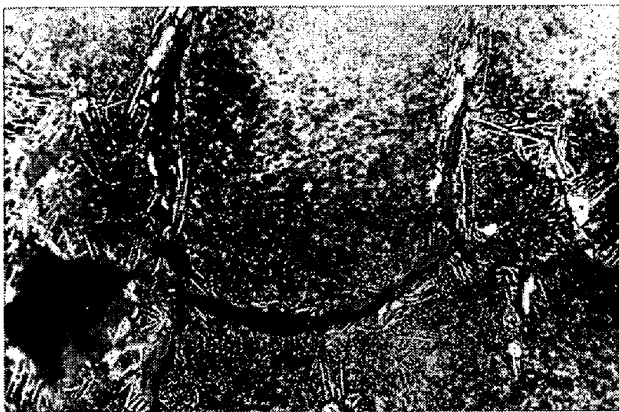


Photo. 8. Heat checks progressing along carbide net work structure.

なスケール疵がのこりその品質を低下せしめる¹¹⁾。肌の荒れた F_1 , F_2 ロールを使用して圧延したコイルの表面に点在するスケール疵の部分縦断して偏光顕微鏡で観察すると、板の全面をおおっている黒皮スケールとは異質の赤褐色のスケールが板の表面に押しこまれており、X線マイクロアナライザーで検定してみると、この部分から多量のクロムが検出される。これらの調査結果から、この赤褐色のスケールは F_1 , F_2 スタンドのロール表面からロールの一部がスケールとともに剝離脱落して板の表面に圧着され、後段スタンド通過中に板の表面に押しこまれつつ酸化して赤さびになったものと考えられる¹²⁾。

Photo. 4 に示す流星状の疵は初期のアダマイトロール



Photo. 9. Rolled stock sticking on the banded roll surface.

に多発し、その後ロールの品質改善によつて減少しているものの、現在でもなおしばしば認められるものである。流星疵の部分詳細に観察すると、Photo. 7 に示すようにロール表面のヒートクラックを基点にしてロールの回転方向と逆に尾を引いている。顕微鏡で観察するとPhoto. 8 に示すようにヒートクラックは初晶セメンタイトを縫つて進行しており、塊状セメンタイトまたはセメンタイト集団部には欠け落ちによるピットが認められる。流星疵の大部分はこのようなピットとはげしいヒートクラックを基点にして発生している。したがつて流星疵を防止するためには適正な鑄造方案と調質によつてセメンタイトを微細化し、組織中に均一に分散せしめてヒートクラックの進行と欠け落ちを防ぐ必要がある。

スケールバンデングはPhoto. 5 に示すようにロール表面の黒皮が部分的に剝離する現象であり、流星疵と同様に圧延条件が苛酷になつた場合に発生する。スケールバンデングの発生位置は必ずしも一定せず、同じロールでも使用するたびに位置が変わることが多い。これは圧延条件やロール水冷条件などが微妙に影響するためだと考えられる。はげしいスケールバンデング発生部を詳細に観察すると、Photo. 9 に示すように被圧延材がロール表面に焼きついておりこの焼きつき現象によつてロール表面の一部がむしり取られている。一度このような焼きつきが起り始めるとロール表面がざらざらに荒れて、ますます焼きつきを助長するので、はげしいバンデングに発展するものと思われる。したがつてバンデングを軽減するためには焼きつきの防止をはかることが好ましく、圧下量の減少やロール水冷の増強などは有効な手段である。またロール材質の面から考察すると、ロール材の熱伝導を良好にしてロール表面に蓄積される熱を速く拡散させることが好ましい。最近高硬度の鑄鋼系複合ロール ($Hs55\sim65$) を仕上げ前段スタンドに使用する試みが行

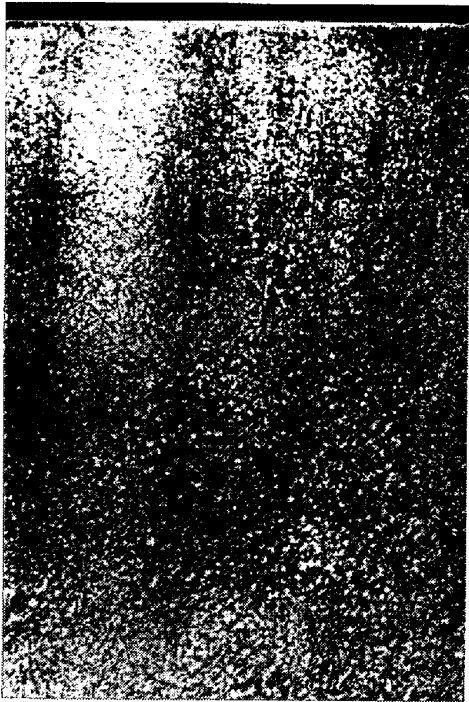


Photo. 10. Etched macro-structure of new developed adamite roll.

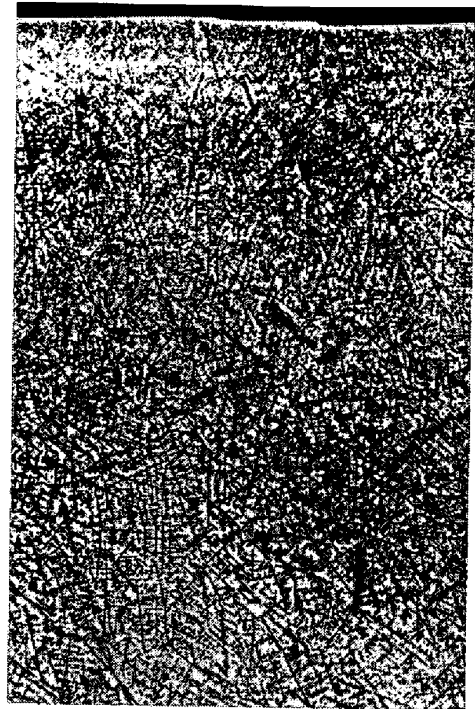


Photo. 11. Etched macro-structure of conventional adamite roll.

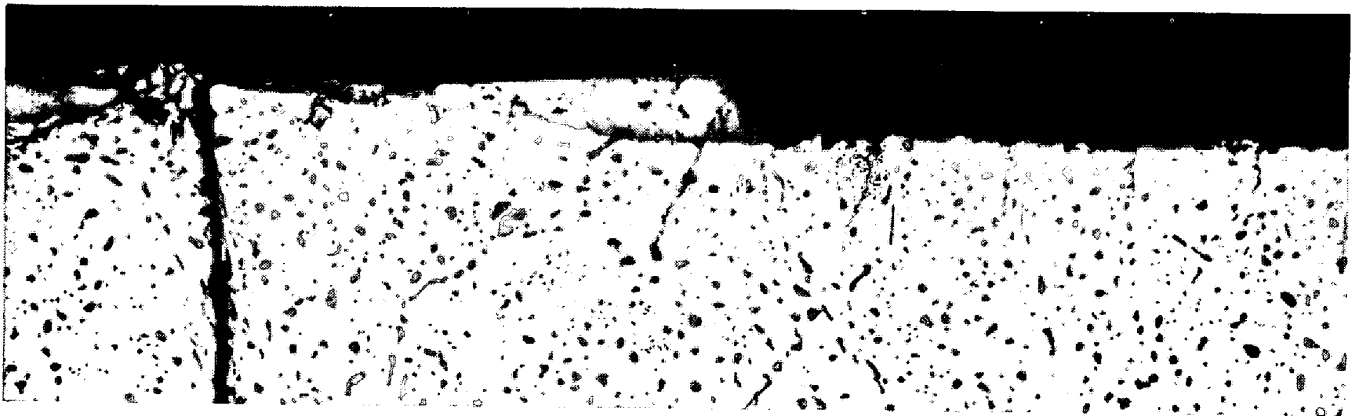


Photo. 12. Partial scale disintegration at the roll surface (section through the roll surface). $\times 400$ (4/5)

なわれているが、ニッケルやクロムなどの合金成分添加によつて硬度を高めたロールは、耐摩耗性が向上するにもかかわらず焼つきつき状のはげしいバンディングを発生して、ロール肌の面から見ればむしろ劣化する傾向がある。これは熱伝導の劣化による焼つきつきのためであると考えられる。有村¹⁾は高硬度複合鋳鋼ロールを異なつた 2 種類の粗圧延機に使用した結果について述べており、56" の逆転式圧延機では好結果が得られたのに反し 80" の粗連続圧延機の後段スタンドでははげしいバンディングが発生したことを報告している。また後者の場合はロール水冷の強化によつて大幅にロール肌荒れが改善されたと述べている。これは圧下や水冷の相異が焼つきつきに大きい影響をおよぼすことを立証している。被圧延材

はロール組織中のマトリックスと焼つきつきやすく、セメントタイトには焼つきつきにくい。かつて流星疵の原因になる塊状セメントタイトを減少させるために炭素含有量を 1.3~1.4% に下げたアダマイトロールが使用されたことがあるが、早期にスケールバンディングを発生し不成績におわつている。これはセメントタイトの減少が焼つきつきを助長することを証明するものであり焼つきつきを防止するためには適量のセメントタイトが必要である。しかし先にも述べたように網目状のセメントタイトや塊状のセメントタイトが存在すると、ヒートクラックを基点にする流星疵が発生するから、焼つきつきと流星疵の両者を考慮して適量のセメントタイトを組織中に均一に分散せしめることが重要である。Photo.10 は改良されたアダマイトロールのマクロ組織を示したものである。Photo.11 に示す従来のロールに比較すると結晶粒がかなり微細化されて

いるのみならずセメントも微細化されて均一に分散している。セメントの微細化によつてクラックや欠け落ちが減少するので、従来よりもセメントを増量することが可能になり、焼きつき防止の条件をも同時に満足させることができる。この種のロールは現在一部の製鉄所で使用されているが、従来品に比較して約2割増の好成績をおさめている。

このほかロール表面をおおつていた黒皮スケールがロール表面のごく一部とともに剝離脱落してにぶい白色光沢のロール肌を呈し、スケールバンディングと類似した外観を呈することがある。このような黒皮の剝離も圧延条件が苛酷な場合に発生するが、ロールに対する被圧延材の焼きつきは認められない。また黒皮の剝離部は微細な梨地状の肌を呈し、かきむしつたような深い疵は存在しない。このような黒皮の剝離が何ゆえに起こるのかはまだ解明されていないが、おそらくロール表面をおおつていた黒皮がワークロールとバックアップロール間の強圧に耐ええずに、Photo.12 に示すようにロール表面から剝離脱落することによつて発生するものと考えられる。このような黒皮の剝離部は苛酷な圧延条件が緩和されるとふたたび黒皮におおわれて良好な肌にもどるので、先に述べた流星疵や焼きつき状のスケールバンギよりも被害が少ない。薄いコイルだけをまとめて圧延せずに、これを分割してその間に適量の厚物コイルをはさんで圧延するのはこのためである。

3.2 仕上げ後段スタンド用ロール

仕上げ後段スタンドには古くから中抜き高合金グレーンロール (Hs76~82) が使用されており、基本的には現在もなお同じ材質のロールが使用されている。先にも述べたように $F_4 \sim F_6$ ではロールがかなり摩耗するので、板の厚み精度が劣化するのみならずコイルのビルドアップが発生することがある。したがつて仕上げ後段スタンド用のロールは耐摩耗性に富むものでなければならない。また F_6 スタンドではロール肌の良否が黒皮コイルの表面粗度や光沢に直接影響するので、肌荒れの起こりにくいロールが喜ばれる。高合金グレーンロールは溶湯を金型に鑄造して作られるので、表面部は金型の冷硬効果によつて組織が微細化されており硬度も高い。しかし内部に入るほどしだいに組織が粗大化して硬度も低下する。したがつてもつとも良好な表面組織を有する新品ロールを最終スタンドに使用して板肌の美化をはかり、ロール径が小さくなるにしたがつて F_5, F_4 におおして使用するのが普通である。先にも述べたようにロールの摩耗がもつとも多いのは F_4, F_5 スタンドであるにもかかわらず、これらのスタンドで使用されるのは小径になつ

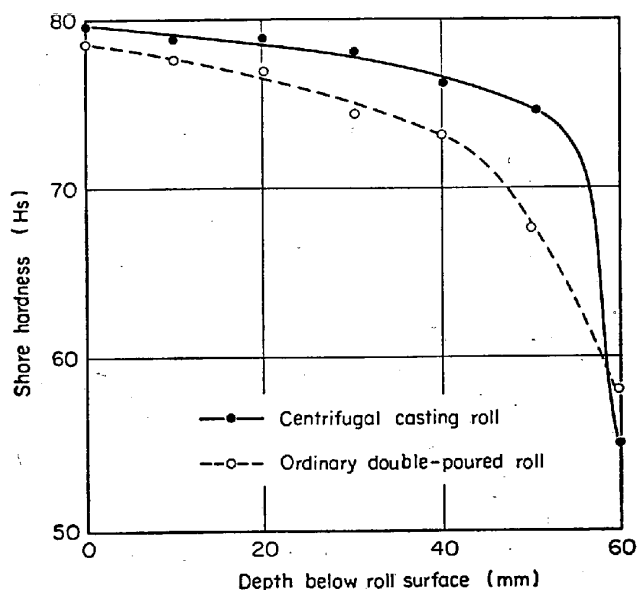
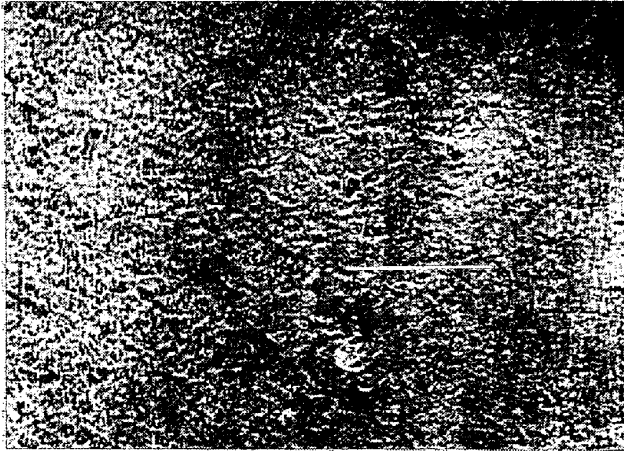


Fig. 2. Internal hardness distribution of the ordinary double-poured roll and new double-poured roll made by centrifugal casting method.

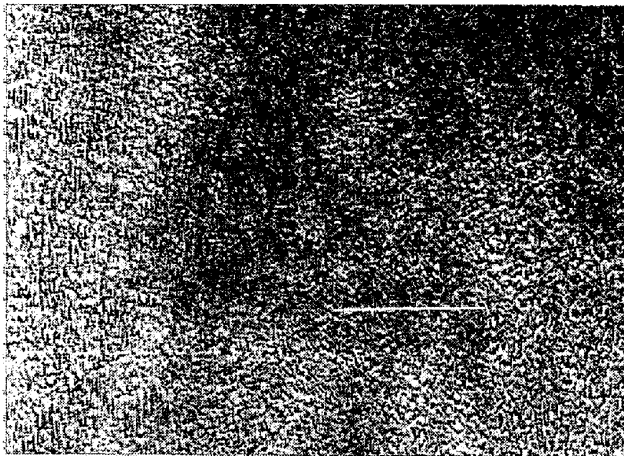
て硬度が低下したロールである。ゆえに F_4, F_5 スタンドのロールの摩耗を軽減するにはまず第一に改削によつてロール直径が小さくなくても組織緻密で硬度低下の少ないロールを作ることである。この目的を達成するための冶金的方法、たとえば適切な核接種法などもあるが、非常に有効な方法の一つとして遠心鑄造法をあげることができる。ロールの遠心鑄造法は衆知のようにまず硬質外殻層を形成する高合金の溶湯を回転金型に鑄入し、外殻層がほぼ凝固したところ軟質の芯湯を鑄込んで2重層のロールを作る方法である。鑄込まれた溶湯が遠心力によつて長時間金型に接触するので十分な冷硬効果を与えることができる。また普通の中抜き法では垂直に立てた金型を満たして高合金の硬度溶湯を鑄入するのに反し、遠心鑄造では高合金の溶湯でまず外殻層になる円筒だけを作るので、高合金溶湯の鑄込み量が普通の中抜き法の場合より少ない。したがつて外殻層の冷却凝固が速く組織が微細化する。そのうえ外殻層円筒の内面からも放熱が行なわれるので内部硬度低下の少ないロールを作ることができる。Fig. 2 は普通の中抜きロールと遠心鑄造で製作したロールの表面から内部にいたる硬度分布を示したものである。

つぎに F_6 スタンドにおけるロールの肌荒れについて考察することにする。ロールの肌荒れは一般にロール自体の硬度と密接な関係があり、同一材質のロールでは高硬度で摩耗の少ないロールが肌荒れも起こりにくい。しかし熱間圧延用のロールではヒートクラックや焼きつき



×20 (7/9)

Photo. 13. Surface of hot sheet rolled by alloyed grain iron roll.



×20 (7/9)

Photo. 14. Surface of hot sheet rolled by alloyed chilled iron roll.

などの特異な現象が起こるので、硬度だけで耐肌荒れ性の良否を判断することは非常に危険である。Photo. 13 と 14 はそれぞれ同一硬度の高合金グレンロールと高合金チルドロールによつて圧延した板の酸洗前の肌を接写したものである。高合金グレンロールは組織中に微細な片状黒鉛が存在するので、完全に黒鉛粒子が存在しない高合金チルドロールよりも肌が荒れやすく、圧延コイルの表面光沢も劣るようである。今後はロールの組替え回数を減らして圧延能率を上げるとともに板の寸法精度や圧延肌に対する要求もますます高度化するものと思われるので、耐摩耗性や耐肌荒れ性に富むロールが要求されるようになり、ロールの高硬度化とチルド化が促進されるものと思われる。しかしロールの高硬度化やチルド化はロール事故の増加に結びつく危険性であるから、ロールの製造ならびに使用に際して十分注意する必要がある。

仕上げ後段用のワークロールには種々の事故が発生する¹⁸⁾¹⁹⁾。現在もつとも問題になっているのはロール表面に発生するクラックとチル剥げであるが、胴部折損も過去において頻発したことがあり、現在でも時折り発生することがある。ワークロールはバックアップロールによつて補強されているので、特別な異常圧延がない限り圧延荷重だけで折損することはない。胴折れしたロールは多くの場合、Photo. 15 に示すように軸に垂直な面で破断している。破損の原因については古くから調査研究が行なわれており、ロール自体の残留応力とロール使用中に発生する熱応力が破損の主要因であることはほぼまちがいないようである。先にも述べたように高合金のグレンロールは金型に鑄込んで作られるから表面と内部の冷却速度の差によつて内部応力を発生する¹⁵⁾。また外層のマルテンサイト変態も内部応力に影響をおよぼす。熱間ストリップ圧延機の仕上げロールの残留応力について現在までに 2, 3 の報告¹⁶⁾¹⁷⁾があるが、いまだ完全に解析されたものは見当たらない。筆者は製造条件の異なる多数の仕上げロールの残留応力をザックス法¹⁸⁾によつて計測し、残留応力の大きさと製造条件の関係を調査したことがある。Fig. 3 は一例として直径 650φ の仕上げ後段ロールの残留応力計測値を示したものである。鑄鉄は一般に圧縮力に強く引張り力に弱いので、ロールの折損に関連する応力はロール中心部に残留している引張応力と考えられる。ロール中心部に残留する引張応力の大きさは、鑄込み条件、鑄込み後の冷却方法、ペーナイトならびにマルテンサイト変態の状況その他多くの要因に支配されるが筆者は中抜き鑄造法の良否がとくに重要であることを確認することができた。内部の黒鉛化が良好で硬質外殻層が薄いほど中心部の残留引張応力は小さい。

使用中のロール温度については種々の研究調査が行なわれている^{19)~22)}。常温で組みこまれたロールは、圧延の進行とともにしだいに温度が上昇し、60~90°C で飽

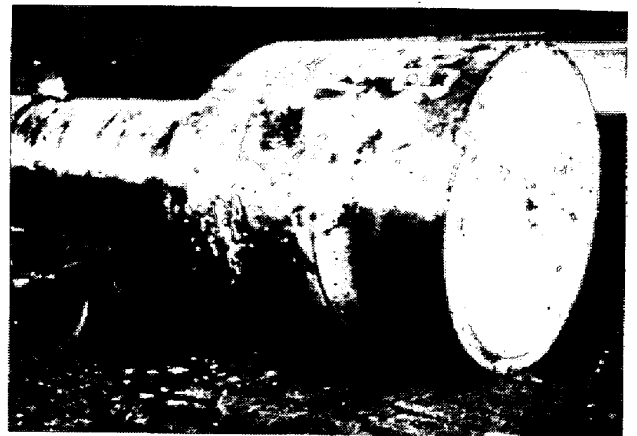


Photo. 15. View of typical break in roll body.

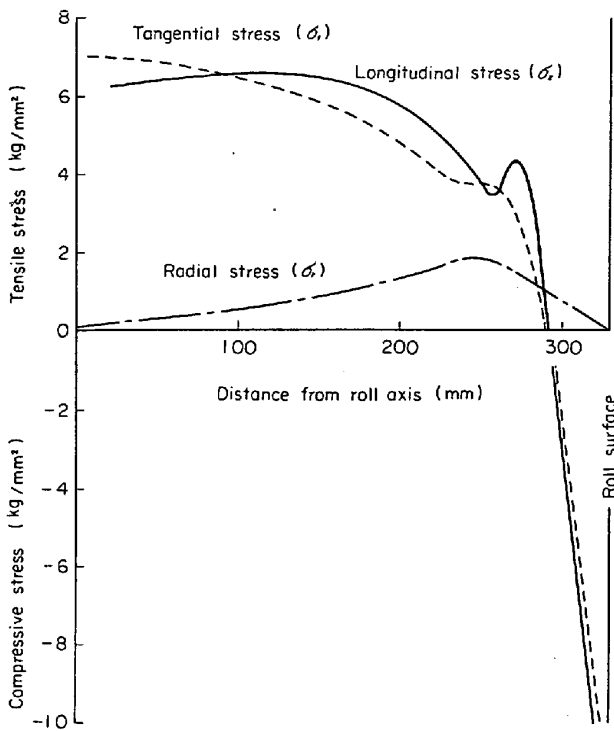


Fig. 3. Residual stress distribution in double-poured alloyed grain roll.

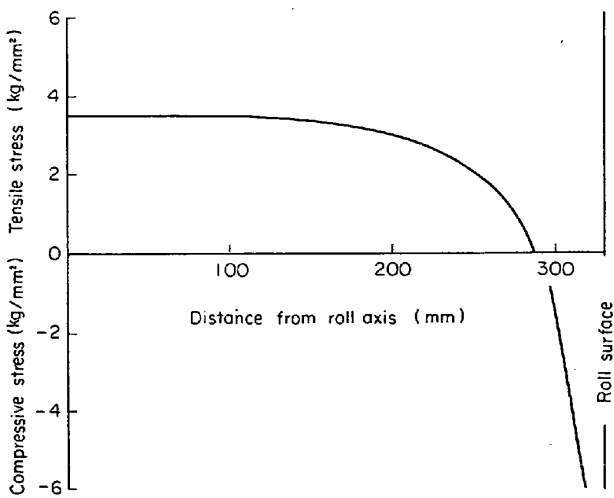


Fig. 4. Longitudinal stress in a roll during the hot rolling.

和温度に到達する。この温度上昇期間中はロール表面温度が中心温度より高くなるので、温度の不均一にもとづく熱応力を発生する。ロールの温度上昇速度実測値をもとにして理論計算で求めた熱応力の分布を Fig. 4 に示す。ロール水冷が悪い場合や単位時間中に多量のコイルを圧延する場合には、ロール温度が急上昇して Fig. 4 に示す値より大きい熱応力を発生する。熱応力を低減するためにはロール表面と中心の温度差を小さくするとともに、ロール材の弾性係数を下げることが好ましい。ロー

ル内部の黒鉛化が良好な場合は熱伝導がよくなり、ロール内外の温度差が減少するとともに弾性係数も下がってロールに発生する熱応力は小さくなる。ロール昇温中に発生する熱応力は先に述べた残留応力と類似した応力分布であるから、ロール使用中には熱応力と残留応力が重畳してロール中心部の合成引張応力はかなり大きくなる。この合成引張応力がロール中心部材料の引張強さを超過すると中心部にクラックを発生してロールは折損する。ロール外殻層が厚く、内部黒鉛化が悪いロールは残留応力、熱応力ともに大きくなるばかりでなく、このようなロールの中心部は引張強さが低く、ひげ巣やざく巣を発生しやすいので折損の危険性が多い。

ロール表面上の任意の1点は1回転に1度、被圧延材と接触して高温度に加熱される。このときのロール最表面温度については理論的な計算値が報告されているだけでなく²¹⁾、ロール表面組織の変化を観察することによって 550~700°C と推測されている。しかしこのような高温度に加熱されるのはロールのごく表面部だけに限られている。ロール表面は常に水冷されているから、このような高温度に加熱された点も1回転する間にほぼもとの温度まで冷却される。ロール表面はこのような急熱急冷の繰り返しをうけるので熱疲労によるヒートクラックを発生する²²⁾。このようにして発生したヒートクラックは1 mm以下の浅いものではあるが、ロール肌荒れの基点になるのでその発生と進行を抑制する必要がある。一般にロールは高硬度になるほど、また組織中のセメントイト量が多くなるほどヒートクラックが深くはげしくなり、組織中の黒鉛粒数が多いほどヒートクラックの発生進行が抑制される。ロールの摩耗肌荒れを軽減するためにロールの高硬度化チルド化をはかると、反面ヒートクラックの発生進行を助長するおそれがあるので、ロール製造に際して十分留意する必要がある。

最後に仕上げ後段用のロールでもつとも問題になる事故、すなわち局部的に発生するクラックとチル剥げについて考察することにしよう。ロールの表面にチル剥げやクラックが発生するとロールの組替えによる圧延能率の低下を招くばかりでなく、これを研削除去するためにロールの消耗量が増加する。Photo. 16, 17 はこの種のクラックとチル剥げの状況を示したものである。なお仕上げワークロールのチル剥げに関して現在までに発表された調査研究報告類を参考文献として末尾に紹介しているので参照されたい^{24)~28)}。クラックチル剥げは F_5 、 F_6 スタンドで発生することが多く、薄い板を多量に圧延している圧延機に多発する。この種の事故は被圧延材のはげしい絞りこみ圧延の後で発見されることが多いが、か

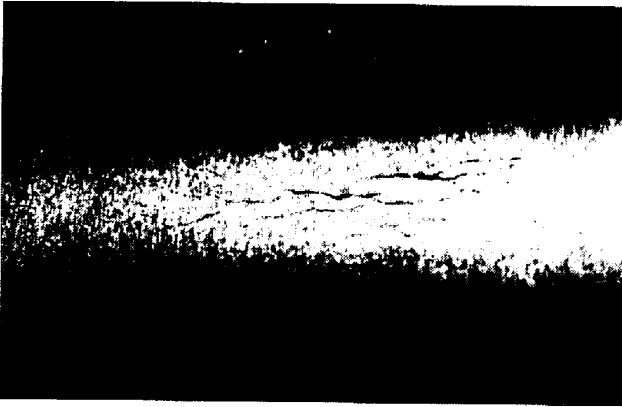


Photo. 16. Cracks due to the rolling of cobbler sheet (after grinding).

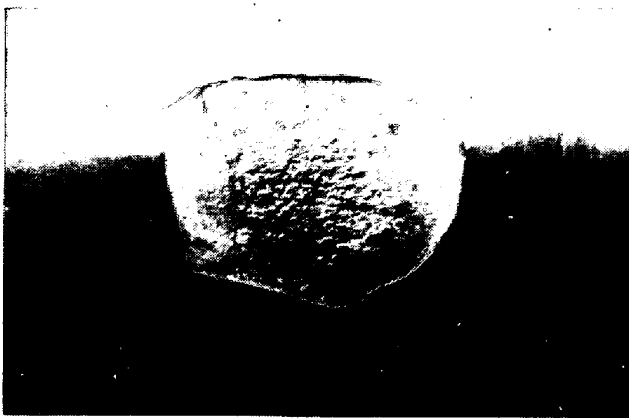


Photo. 17. Surface spalling due to the rolling of cobbled sheet.

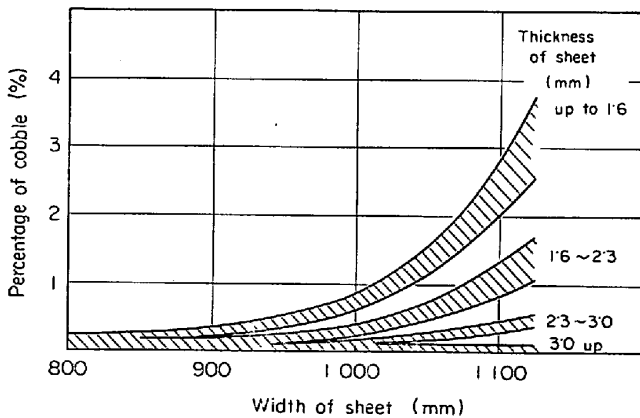


Fig. 5. Relation between the size of sheet and percentage of cobbler.

ならずしもこのような異常圧延の直後に発見されるとは限らず、正常圧延中または研削中に発見されることもある。しかしその原因を追跡してゆくと、多くの場合クラックが発見される以前に絞りこみ圧延があつたことを知ることができる。はげしい絞りこみ圧延の際には板がロール表面に焼きつき、ロール表面は急加熱されてヒートクラックを発生する³⁰⁾。また関本³¹⁾は絞りこみの際には

異常な圧延摩擦力が作用してロール表面に大きい引張応力が発生し、クラックができることを理論的に説明している。また同時に高い圧延圧力によつてロール表面直下に大きい剪断応力が発生し、クラックが表面に対して斜に進行してチル剥げに発展することを述べている。Fig. 5は某製鉄所における圧延製品の寸法と絞りこみ発生頻度との関係を図示したものである。薄くて幅の広いコイルを圧延する際に絞りこみの発生頻度が高く、このようなコイルを多量に圧延しているミルにクラックやチル剥げが多発する事実は、クラックやチル剥げの原因が絞りこみ圧延によるという上記の理論を裏づけするものである。したがつてこの種の事故を防止するには板の絞りこみ圧延を避けるか、または板が絞りこんでもそれに耐えるロール材質を開発する必要がある。

絞りこみは一般に圧延条件や圧延操作の不良にもとづくものとみなされているが、使用するロールの性質もまたこの種の事故にまったく無関係ではない。仕上げ後段スタンド用ロールは先にも述べたように中抜き製造法によつて作られているので、必ずしも全体が対称的均質であるとはいえない。すなわち中抜きロールの外殻層になる硬質の溶湯を金型に鑄込み、しばらく待つて適当な厚さの外殻層が凝固したところをみはからい、下型からロール芯部を形成する軟質の溶湯を鑄込んで未凝固の硬質湯を上型から排出しつつ芯部を軟質の湯に置換して作ったものである。したがつて均一な厚さの外殻層を作ることが困難であり、一般に下型側の外殻層が薄く上型側が厚くなる傾向がある。またロール芯部は硬質溶湯と軟質溶湯が混合しながら下型側からしだいに軟質の湯に置換されてゆくの、上型と下型の化学成分はいくぶん違ったものになり、上型よりも下型のほうが軟質溶湯の混合率が高い。したがつてロール駆動側(下型側)と操作側(上型側)で差異があるばかりでなく、ロール円周方向にも多少の差異が生じ、ロール使用時に熱膨張量やロール偏平化量の差となつてあらわれ、ひいては被圧延材の厚み不同をまねく。650 mmφの完全剛体ロール(偏平化しないロール)で900°Cの鋼板を2.45 mmから1.75 mmに圧延する場合を想定し、これと同じ圧延荷重のもとで普通のロールを使用した場合に圧延後の板厚が何耗になるか計算したものがTable 2である。ただし普通ロールの硬質外殻層の弾性係数を $1.7 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ と仮定した。

実在の普通ロールは完全剛体ではないから、バックアップロールと被圧延材から上下の荷重をうけて偏平化し、板の伸びが悪くなつて理想的な剛体ロールを使用した場合のように薄い板はえられない³²⁾。ロール外殻層が

Table 2. Influence of roll flattening on the thickness of rolled sheet.

Kinds of roll	Thickness of roll shell (mm)	Coefficient of elasticity in roll core (kg/mm ²)	Thickness of sheet before rolling (mm)	Thickness of sheet after rolling (mm)
Perfect rigid roll (A)	—	—	2.45	1.75
Ordinary roll (B)	50	0.9×10^4	2.45	1.89
Ordinary roll (C)	30	0.7×10^4	2.45	2.06

厚く芯部の弾性係数が高いロール (B) と外殻層が薄く内部の弾性係数が低いロール (C) を比較すると、前者は後者より剛体ロールに近い条件になるので圧延後の板は薄くなる。中抜き鑄造法で製作したロールの上型側は前者の条件に類似しており、同じロールの下型側は後者の条件に相当するので、組込み時にロール駆動側と操作側のロール間隙を同じにセットしておく、圧延後の板は操作側のほうが薄くなる。したがってこのようなロールを使用すると製品コイルの厚み不同を避けるため圧延操作によつて常に微妙な調整を行なう必要を生じ、一歩調整を誤ると板の絞りこみを発生することになる。またロールは均一に製作されていても硬質外殻層が薄く芯部の弾性係数が低いロールは扁平化しやすく板の伸びが悪くなるので、所定厚さの板を圧延するために圧下力を増す必要を生じ圧延はやりずらくなる。このように不均質なロールや剛性度の低いロールは圧延操作が厄介になるため、絞りこみそのたの事故率が高くなる。筆者は実際に使用された多数のロールを外殻層厚さの不均一性や内部の剛性度によつて使いやすいロールと使いにくいロールに分類し、ロールの良否と圧延成績の関連性を調査した結果、明らかな有意差を認めることができた。

以上詳述したように板の絞りこみ圧延を軽減するためには均一で剛性度の高いロールが好ましいが、中抜き鑄造法はまえにも述べたように鑄造条件の管理が非常にむずかしく、高度の技術と長年の経験をもつてしてもなお完全に均質なロールを製作することが困難である。これに反し遠心鑄造は均一な厚さの硬質外殻層がほぼ凝固した後芯部を形成する湯を鑄こむので、ロール軸方向半径方向ともに対称均一なロールを作ることが容易である。しかも芯部を形成する湯は外殻層を形成する湯とほとんど混合しないから、ロールの剛性度を考慮した最適の成分に規定することができる。したがって遠心鑄造法は板の絞りこみを軽減するためにも一歩進んだ製造方法といえる。ここで注意すべきことは、ロールの硬質外殻層を厚く製作し、かつ内部材料の弾性係数を高めて剛性化することは残留応力や熱応力を増大してロールの折損を招く危険性があるから、板の伸びとロール折損の両者を勘案し使用条件も考慮して適当な製造条

件を決定する必要がある。

さきにも述べたように板の絞りこみは必ずしもロールの性状のみによつてきまるものではなく、圧延操作の良否も重要な要因の一つであるから、不幸にして板の絞りこみや異物の噛みこみなど局部的な強圧をうけた場合でもクラックやチル剥げを発生しないロールが好ましい。統計的な調査によつて現在までに明らかになっていることは、ヒートクラックに対して弱いロールは板の絞りこみによるクラックチル剥げに対しても弱いということである。すなわち、高硬度で黒鉛粒子の少ないロールはクラックチル剥げを発生しやすく、かつ発生した場合には一般に深いクラックになりやすい。したがって耐摩耗性や耐肌荒れ性を改善する目的で、ただ単にロールの高硬度化やチルド化を進めることはチル剥げ、クラックの面から見れば非常に危険である。耐摩耗性を犠牲にせずクラックやチル剥げに対する抵抗性を高める方法、たとえば黒鉛粒子を微細化して組織中に均一に分散させる方法などが現在研究されており、逆にチル剥げ、クラックに対する強度を低下させることなく耐摩耗性を高めるための研究も進められている。

4. 結 び

ホットストリップミルに使用されているワークロールの歴史と最近の進歩について概観し、現在の問題点とその対策については筆者の意見も加えて若干ふれることができた。今後ますます圧延能率と製品品質の向上が要求され、ロールに対する要望もいよいよ苛酷なものになると思われる。幸に本邦のロール製造技術は先進国を抜く水準に達し、日本特長の優秀な技術も開発されているので、これを基盤としてさらに開発改善を進め鉄鋼業の進歩発展に寄与したいと願っている。圧延とロールは密接な関係にあり、圧延機や圧延方法の微妙な相異によつてこれに使用する最適ロールの性質も変わるので、ロールの品質を改善してゆくためにはロール製造者と使用者の密接な連繋が必要である。すなわちロール製造者はそのロールが使われる納入先の圧延条件をよく知つて使用条件に適合したロールを作り、使用者は使用するロールの性質を知り、その特長を生かし欠点を補つて使用する

ことが望ましい。本資料がロール製造者と使用者の間の橋わたしの役に立てば筆者の望外の喜びである。

文 献

- 1) 有村, 黒津, 福永: 鉄と鋼, 56 (1970) 4, p. 283
- 2) D. G. SACHS, V. LATORRE, and K. CHAKKO: Iron Steel Eng., (1961) 12, p. 71
- 3) TAFEL: Flat Rolled Products, Metallurgical Society Conferences, Vol. 1 (1959) p. 43
- 4) 田部, 鈴木: 日本製鋼所技報, 26 (1969) 11, p. 14
- 5) 堀, 田部: 鉄と鋼, 55 (1969) 3, p. 163
- 6) R. V. WILLIAMS, and G. M. BOXALL: JISI, (1965) 4, p. 369
- 7) C. E. PETERSON: Iron Steel Eng., (1956) 12, p. 98
- 8) W. J. WILLIAMS: Iron Steel, (1962) 8, p. 372
- 9) 奥本, 新山: 鉄と鋼, 50 (1964) 4
- 10) F. H. ALLISON Jr: Iron Steel Eng., (1956) 6, p. 98
- 11) 小野田, 岡部, 能美, 長谷: 住友金属: 20(1968) 1
- 12) 添野, 玉村, 赤堀, 末永, 田中: 日立評論, 50 (1968) 6, p. 63
- 13) F. PECK Jr. and T. MAVIS: Iron Steel Eng., (1955) 8, p. 121
- 14) F. PECK Jr. and T. MAVIS: Iron Steel Eng., (1956) 3, p. 53
- 15) 河原: 日本機械学会論文集, 19 (1953) 87, p. 54
- 16) M. DIGIOIA Jr. and F. PECK Jr: Iron Steel Eng., (1956) 12, p. 121
- 18) G. SACHS: Z. Metallk., (1927) 19, p. 352
- 19) F. PECK Jr. and T. MAVIS: Iron Steel Eng., (1954) 6, p. 45
- 20) M. BELANSKY, and F. PECK Jr.: Iron Steel Eng., (1956) 3, p. 62
- 21) 関本: 日立評論別冊 42 号 (1961) 5, p. 43
- 22) S. CERNI, S. WEINSTEIN, and F. ZOROWSKI: Iron Steel Eng., (1963) 9, p. 165
- 23) 河原: 日本機械学会論文集, 19 (1953) 83, p. 82
- 24) D. KELLER: Iron Steel Eng., (1960) 12, p. 171
- 25) V. LATORRE and K. CHAKKO: Iron Steel Eng., (1962) 12, p. 149
- 26) N. TONG, K. CHAKKO and V. LATORRE: Iron Steel Eng., (1963) 7, p. 113
- 27) N. TONG and, K. CHAKKO: Iron Steel Eng., (1964) 7, p. 143
- 28) K. CHAKKO and N. TONG: Iron Steel Eng., (1965) 10, p. 141
- 29) H. ALLISON Jr.: Iron Steel Eng., (1966) 2, p. 93
- 30) 関本: 鉄と鋼, 55 (1969) 3, p. 160, p. 161, p. 162
- 31) 関本: 日立評論, 46 (1964) 9, p. 91
- 32) F. ZOROWSKI and S. WEINSTEIN: Iron Steel Eng., (1962) 6, p. 103