

熱間圧延時の鋼板スケール疵に及ぼす ロール肌荒れの影響

後藤 邦夫*・岡田 光*・佐々木 強*²・小出 太郎*²

Effects of Roll Surface Deteriorations on Scale Defect in Hot Rolling

Kunio GOTOH, Hikaru OKADA, Tuiyoshi SASAKI and Taro KOIDE

Synopsis : Roll surface deteriorations and scale deformation behavior in hot rolling are investigated in order to clarify a mechanism of rolling load increase and scale defect formation on using high speed steel roll. Several experiments are conducted; a rolling/sliding friction test at elevated temperature and model rolling tests for the sheet coil and plate by using high Cr cast iron and high speed steel as roll material. The results obtained are as follows; (1) Worn surface of high Cr cast iron is flat and smooth in hot rolling. On the other hand, fine asperities are formed on worn surface of high speed steel. It is found that this peculiar topography of high speed steel consists of MC carbides which are left by prior wear of matrix in roll microstructure and black oxide film which prevent MC carbides from removing from worn surface, which leads higher friction coefficient and higher rolling load. (2) Fine asperities cause scale heterogeneous deformation of the steel products in roll bite, resulting in scale defect. (3) Heterogeneous scale deformation is easily occurs under conditions with the large oxide film on the steel before rolling and the large reduction in thickness and the high rolling temperature.

Key words : hot rolling; roll material; oxide film; scale defect; surface roughness; surface deteriorations; high speed steel roll.

1. 緒言

近年、薄鋼板の国内熱間圧延ミルでは、仕上げスタンドを中心に耐摩耗性、耐肌荒れ性に優れたハイスロールが使用されており、ロール原単位低減、単位圧延量の増加、ロール在庫圧縮等のコスト合理化に寄与していることが報告¹⁻⁴⁾されている。また、一方でハイスロール導入当初から圧延荷重が従来使用の高Cr鋳鉄ロールに比べ高いこと⁵⁾、鋼板スケール疵に対する感受性が高いこと⁶⁾そして後段スタンドでの通板性や耐事故性不良の問題⁷⁾等も指摘されていた。

ハイスロール使用時の圧延荷重増加現象については、摩耗の進行に伴ってロール金属組織中に存在する微細な高硬度炭化物が摩擦面に突出し摩擦が高くなるとするスパイク説⁵⁾や欠落した硬質炭化物が硬度の低い基地部に筋状マイクロ凹凸を発生させ摩擦が高くなるとする説⁸⁾が報告されている。このように圧延荷重増加現象は、微視的なロール摩耗形態と関連性が深いと考えられるが、黒皮の形成・剥離⁹⁻¹²⁾など複雑な様相を呈するロール肌荒れとの関係についてはまだ不明な点も多い。

ロール肌荒れ現象を本質的に解明するために高温摩擦試験機¹³⁾、高温転動摩擦試験機^{13,14)}、圧延シミュレータ¹⁵⁻¹⁷⁾などを用いて実験的に摩擦・摩耗特性、焼付き機構、黒

皮生成等を検討した研究が活発に行われている。しかし、これまで鋼板スケール疵に及ぼす圧延条件の影響について検討された例^{18,19)}はあるもののロール肌荒れとの関係で系統的に検討された研究はない。

そこで本研究では、高温転動摩擦試験、熱間圧延シミュレータ試験に加えて圧延時における鋼板スケールの変形挙動を調べるため熱間切り板圧延試験^{6,16)}を実施し、ハイスロールの金属組織学的な特徴とロール肌荒れとの関連性、圧延荷重増加現象の再現とその機構そして鋼板スケール疵発生機構について考察した。

2. 試験方法

2.1 高温転動摩擦試験

二つの円板を押しつけて転動させるころがりすべり方式の高温転動摩擦試験によりロール材と圧延材との間の摩擦係数変化を調べた。その試験装置の概要をFig. 1に示す。ロール材試験片($\phi 100\text{ mm} \times 30\text{ mm}$)は、高周波誘導加熱により 900°C に昇温された相手材($\phi 120\text{ mm} \times 10\text{ mm}$)との摩擦負荷と水冷とを繰返し受ける。ロール材および相手材の摩擦面は、予め $0.2\mu\text{mRa}$ に仕上げ、アルコールで脱脂洗浄されている。試験条件と供試材の化学成分をそれぞれTable 1, Table 2に示す。ロール材には、熱間圧延仕上スタ

平成10年1月27日受付 平成10年9月18日受理 (Received on Jan. 27, 1998; Accepted on Sep. 18, 1998)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Corporate Research & Development Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-8 Fuso-cho Amagasaki 660-0891)

* 2 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

ンドの前段で使用実績のあるハイスと高Cr鋳鉄を、相手材には、ステンレス鋼(SUS304)を用いた。本試験では、相手材に発生するスケールを摩擦直前にデスクレーンできないため相手材に普通鋼を用いるとスケールが過度に成長し、剥離脱落を起こす際に摩擦係数変化に大きな影響を与え、ロール材の影響が現れにくくなる。また、普通鋼は、熱間変形抵抗が低いため試験中に圧延材の一部が変形し、面圧等の試験条件を一定に保つことが困難である。そのため次善の策としてスケール成長が少なく安定で熱間変形抵抗の高いステンレス鋼を相手材として用いた。各ロール材

の高温摩擦特性は、ロール材摩擦面の直接観察と摩擦係数の変化を測定することによって調査した。なお、摩擦係数は、荷重とトルクの変化から自動計測されている。

2.2 コイル熱間圧延試験

ロール肌荒れの再現には、実際に狭幅コイルを圧延するタイプの熱間圧延シミュレータを使用した。その概要をFig. 2に示す。加熱炉内(N₂ガス雰囲気)において約1100°Cに加熱されたコイルは、メカニカルデスクレーンにより一次スケールを除去された後、供試圧延ロールが組込まれた4段式圧延機により圧延され、巻き取られる。圧延機入側には、圧延油供給装置、出側にはロール水冷装置が配置されている。なお、本試験では圧延油を使用しなかった。圧延ロール材には、Table 2に示す化学成分からなる高Cr鋳鉄とハイスを、補強ロール材には、鍛鋼を使用した。一方、圧延材には、極低炭素鋼(SPCC)のコイル(厚み1mm、幅40mm)を用いた。主な試験条件をTable 3に示す。各供試圧延ロールにより上記コイルを約500m連続圧延した後に圧延ロールに発生した肌荒れを観察した。また、圧下率を変えて同様の試験を行うことによりロール肌荒れ形態と圧延荷重増加現象との関連性についても調査した。

Table 1. Experimental conditions of the friction test at elevated temperature.

Temperature of mated specimen	900°C
Maximum Hertzian stress	300MPa
Slipping ratio	20%
Rolling speed of roll specimen	1.05m/s
Roll specimen	High Cr cast iron/High speed steel φ 100mm × 10mm ¹
Mated specimen	SUS304, φ 120mm × 10mm ¹

Table 2. Chemical compositions (wt%) of roll materials.

	C	Cr	Mo	V	W	Hardness (HRC)
High speed steel	2.0	4.0	2.9	4.1	4.0	60
High Cr cast iron	2.7	17.1	0.9	-	-	55

2.3 切板熱間圧延試験

Fig. 3に示す2基の圧延機による切板圧延により噛込み性鋼板スケール疵の再現を試みた。ロールの金属組織学的な特徴に起因して発生すると考えられるロール肌荒れを以下の方法によりロール表面に人工的に形成した。つまり、ロール表面上の金属組織の内、基地部分を王水で腐食溶解し、炭化物部分のみを表面に突出させたのである。これにより、炭化物より硬度が相対的に低い基地部分が優先的に摩耗した実機ロールの肌荒れ現象を再現した。この供試口

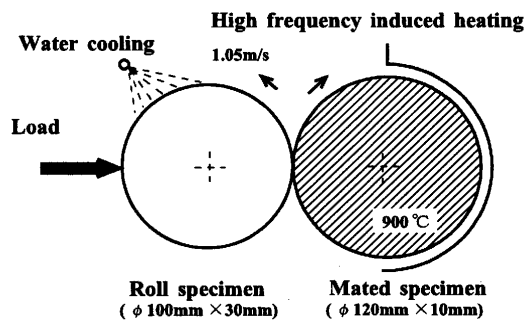


Fig. 1. Schematic diagram of the friction test at elevated temperature.

Table 3. Experimental conditions of the modle hot rolling test for the sheet coil.

Reduction ratio	10~30 %
Rolling temperature	950 °C
Rolling speed	150 m/min.
Strip	SPCC, 1 ¹ mm × 40 ^w mm × 700 ¹ m
Work/Back up roll diameter & barrel length	φ 100mm/ φ 200mm × 300mm
Atmosphere of furance	N ₂ gas

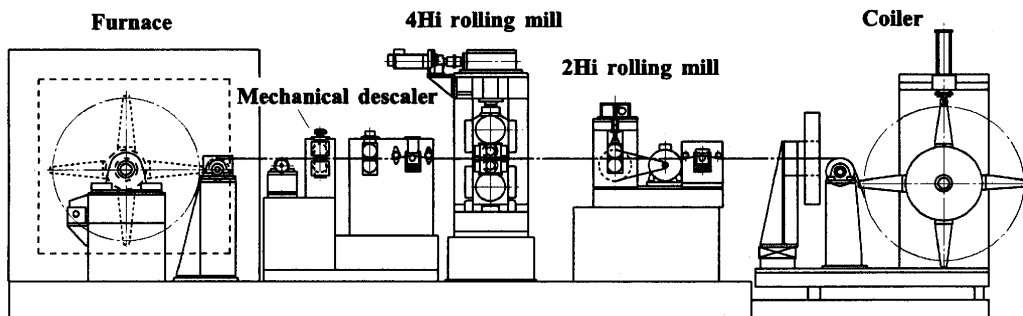


Fig. 2. Schematic diagram of the modle rolling test for the sheet coil.

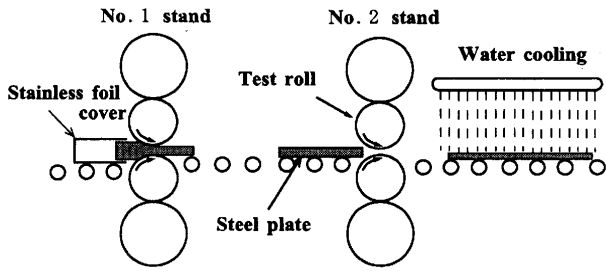


Fig. 3. Schematic diagram of the modle rolling test for the sheet plate.

Table 4. Experimental conditions of the modle hot rolling test for the sheet plate.

Reduction ratio at No.1 stand	38 %
Reduction ratio at No.2 stand	5-50 %
Rolling temperature at No.2 stand	820-1060 °C
Material of plate	low carbon steel
Scale thickness of plate before rolling at No.2 stand	2-20 μm
Roll surface finishing	As polished / As etched

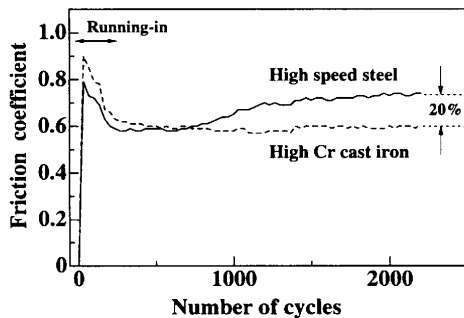


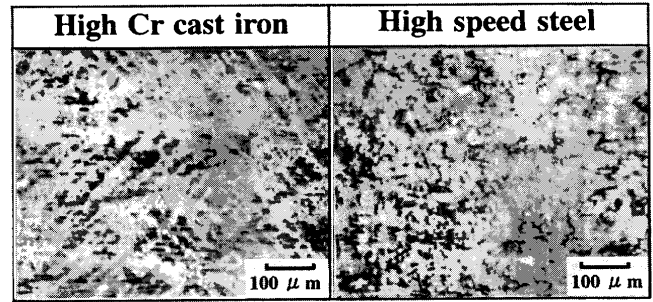
Fig. 4. Variation of friction coefficient. Friction coefficient of high speed steel is larger 20% than that of high Cr cast iron in steady state (number of cycles > 1500 cycle).

ールをNo. 2圧延機の上圧延ロールとして組込んだ。切板は、酸化防止のためステンレス鋼(SUS304)製のカバー材で梱包した上で加熱炉で所定温度に加熱される。No. 1圧延機での圧延直前にカバー材から引き抜かれた切板は、圧延機間で所定スケール厚みになるまで酸化された後、No. 2圧延機で圧延、水冷される。供試ロール材には、高Cr鋳鉄とハイスを用い、通常通り研削仕上げしたものと腐食仕上げした2種類を準備した。その試験条件をTable 4に示す。

3. 実験結果

3.1 摩擦係数に及ぼすロール材質の影響

高温転動摩耗試験によりロール材と相手材との間の摩擦係数を調べた結果をFig. 4に示す。摩擦係数は、両ロール



High Cr cast iron

High speed steel



Fig. 5. Optical micrographs and profiles of worn roll surface after friction test.

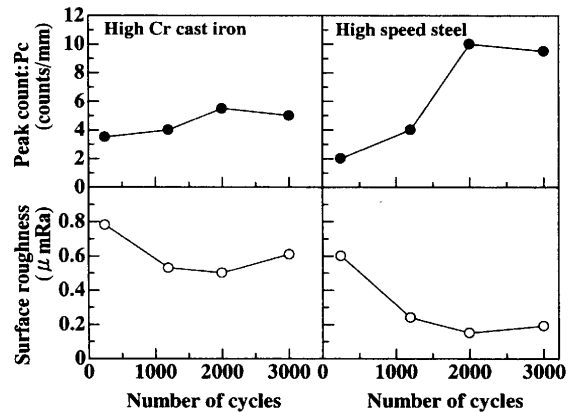


Fig. 6. Change of surface roughness Ra and peak count Pc with number of cycles. Friction coefficient is closely dependent upon Pc.

材とも接触直後に最も高い値を示し、その後、摩擦回数500~600回まで徐々に減少している。これは、表面粗さ等の影響によるなじみ現象であると考えられる。その後、高Cr鋳鉄の摩擦係数は、ほぼ一定値を維持するが、ハイスのそれは、一度最小値を示した後、上昇に転じ、定常状態に達することが判明した。また、この定常状態においてハイスは、高Cr鋳鉄よりも約20%高い摩擦係数を示した。

Fig. 5に試験後における各ロール摩擦面の光学顕微鏡写真と表面粗さ調査結果を示す。両者を比較した結果、高Cr鋳鉄は、写真中の白い部分が丘として残り、黒い部分が選択的に摩耗した表面形態をしているのに対し、ハイスは、表面粗さが細かく、微細な粒状物が表面に顔を出した表面形態をしていることがわかった。

つぎに、摩擦回数の増加に伴う表面粗さの変化を調べた結果をFig. 6に示す。一般的な表面粗さの大小を表す中心線平均粗さ(Ra)の他に山の数を表すピークカウント(Pc)について整理した。Pcの測定条件は、基準長さ1.5mm、上カウントレベル0.15 μmとした。

高Cr鋳鉄の場合、Ra、Pcの変化は比較的少ない。しかし、ハイスの場合、摩擦初期から徐々にRaは低下する一方でPcは逆に増加傾向を示している。このようなハイスの表面形態の変化により摩擦回数700回あたりから摩擦係数が増加したものと考えられる。

以上のことなどから、ハイス表面に存在する微細な突起が摩擦係数増加に何らかの影響を及ぼしているものと推定される。

3.2 ロール肌荒れ現象の再現

薄鋼板の熱間圧延ラインにおける仕上タンデムミルの1~3号圧延機に組込まれた圧延ロールに発生する代表的な

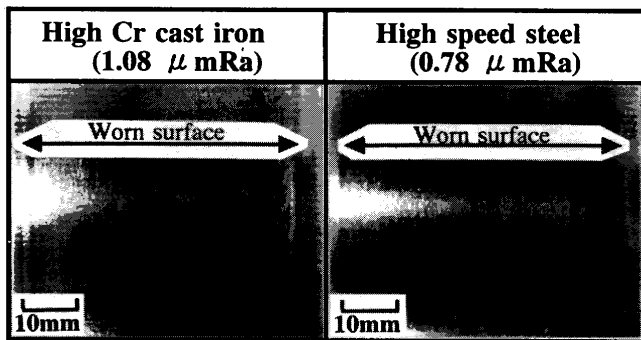
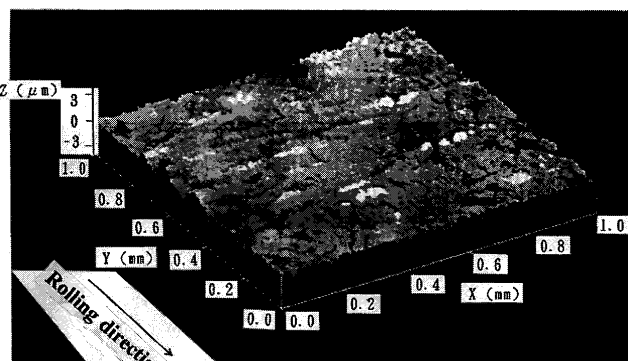


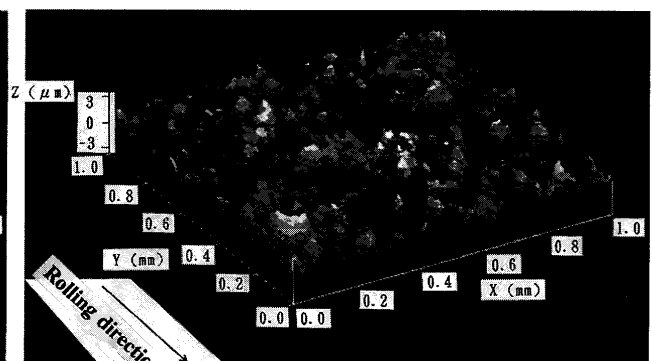
Fig. 7. Photographs of surface deteriorations in high Cr cast iron and high speed steel rolls, simulated by using the model hot rolling mill for the sheet coil.



Fig. 8. Optical micrograph of worn surface of high Cr cast iron. A lot of firecracks exist, which is perpendicular to rolling direction.



(a) High Cr cast iron



(b) High speed steel

Fig. 9. Topographic images of worn surface (a) High Cr cast iron (b) High speed steel at the area of 1 × 1 mm².

肌荒れを熱間圧延シミュレータにより再現することを試みた。その再現例をFig. 7に示す。これらは、黒皮とその一部が剥離した、いわゆる流星状肌荒れに類似したものであると考えられる。黒皮生成の時期は、高Cr鋳鉄、ハイスとも大差なかった。

流星状肌荒れは、黒皮がロール回転方向に平行に微小剥離したものであり、特に負荷の高い通板部エッジ付近に密集して発生していることがわかる。また、通板部最エッジには、圧延材の移着と考えられる線状焼付き疵も観察された。さらに、Fig. 8に示すようにロール軸方向に平行に微細な熱き裂が多数存在することも確認された。これらの肌荒れ現象は、実機のそれを比較的良く再現していると考えられる。また、Fig. 6において試験後の両ロール材（初期表面粗さ：0.20 μmRa）の表面粗さを比べると高Cr鋳鉄の方が大きいことから、圧延に伴う肌荒れの進行は、高Cr鋳鉄の方が早かったと考えられる。

つぎに、試験後のロール表面を3次元粗度測定した結果をFig. 9に示す。これによると高Cr鋳鉄は、平坦で緩やかな凹凸を主体としているのに対し、ハイスは、微細な突起が多数存在していることが確認された。

また、試験後の表面粗度の大きさが転動摩擦試験結果と異なるのは、転動摩擦試験では、圧延材に普通鋼ではなくステンレス鋼を用いたためロール材側に黒皮の形成がなく比較的厳しい圧延条件となり耐摩耗性の高いハイス(0.2 μmRa)の方が高Cr鋳鉄(0.6 μmRa)に比べ表面粗度が小さくなったためと考えられる。一方、熱延シミュレーター試験では、圧延材に普通鋼を用いたためロール表面に黒皮が形成され、その保護効果によりロール表面粗さが同程度(ハイス：0.78 μmRa、高Cr鋳鉄：1.08 μmRa)になったものと考えられる。しかし、いずれの試験においてもハイス表面には微細突起が多数存在するという形態に関する特徴は一致している。

3.3 鋼板スケール変形挙動

各供試ロールにより圧延された切板表面のスケール状態を走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した結果をFig.10に示

す。研削肌の状態であればロール材質に関係なく圧延後の切板表面のスケールは、均一な厚み分布をしていることがわかる。一方、肌荒れが進行した肌を人工的に付与した腐食肌の状態では、高Cr鋳鉄ロールで圧延された場合は、研削肌とほぼ同じ傾向を示すのに対し、ハイスロールで圧延されたものは、厚みが不均一でスケールと切板母材界面の凹凸が大きくなっていることがわかる。

3.4 圧延条件の影響

圧延時の鋼板スケールの变形挙動に及ぼす圧延条件の影響について調べた結果をFig.11に示す。圧延後の切り板の表面スケールを地鉄が溶出しないようにインヒビター添加により酸洗除去し、その界面粗度(Rmax)を測定することにより鋼板表面スケールの变形挙動を調べた。その結果、ハイスロール使用時には、(a)圧延直前の鋼板スケールが厚いほど、(b)圧下率が高くなるほど、(c)鋼板温度が高い

ほど鋼板スケールが不均一な変形を起こしやすいことが判明した。

4. 考察

4.1 圧延荷重増加機構

コイル熱間圧延試験において圧下率を10~30%に変化させ、ロール肌荒れが圧延荷重に及ぼす影響について調べた結果をFig.12に示す。この結果、ハイスロール使用時の圧延荷重は、高Cr鋳鉄ロール使用時よりも10~20%高くなり、圧下率が高くなるほど荷重増加率も高くなることが判明した。また、黒皮が、両ロール材とも圧下率20%以上で発生していることも確認された。

比較のため切板熱間圧延試験と同様の方法により研削肌(0.15 μmRa)のハイスを腐食させ、意図的にロール表面に金属組織中の硬質炭化物を露出させたロール(1.88 μmRa)を準備し、同様の条件で試験を行った結果、黒皮発生のない低圧下率側(10~20%)において更に荷重増加率が高くなることがわかった。しかし、黒皮が発生した圧下率20%以上では、ほぼ同程度の増加率となった。

これは、黒皮が形成されることにより硬質炭化物が表面に露出した際にできる微細凹凸による摩擦増加作用が緩和されたためと推定される。

Fig.13に各ロール材の肌荒れ形態の違いを模式的に示す。高Cr鋳鉄の肌荒れ形態が、比較的なだらかな丘と深い谷からなるのに対し、ハイスのそれは、多くの微小凹凸と釣り鐘状の山からなる。Fig.14に供試圧延ロール表層部の金属組織写真を示す。微視的なロール表面形態と金属組織との比較からもハイスロールの凸部もしくはその下層部に炭化物の存在が予測される。

以上のようにハイスロールを使用して熱間圧延する際の圧延荷重の増加は、ロール金属組織中の基地や炭化物(形状、寸法、量、硬さ、分布等)の影響を受け形成された微細凹凸を特徴とする表面形態と黒皮の有無によって起こ

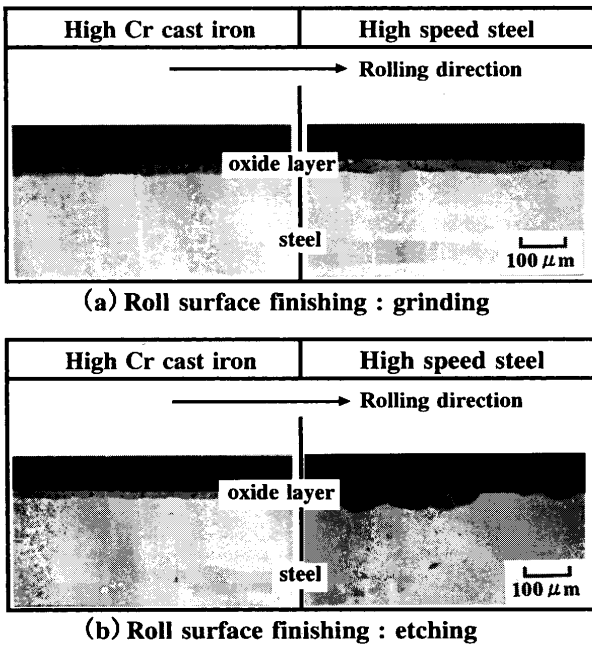


Fig. 10. Cross sectional photographs of steel plate after hot rolling.

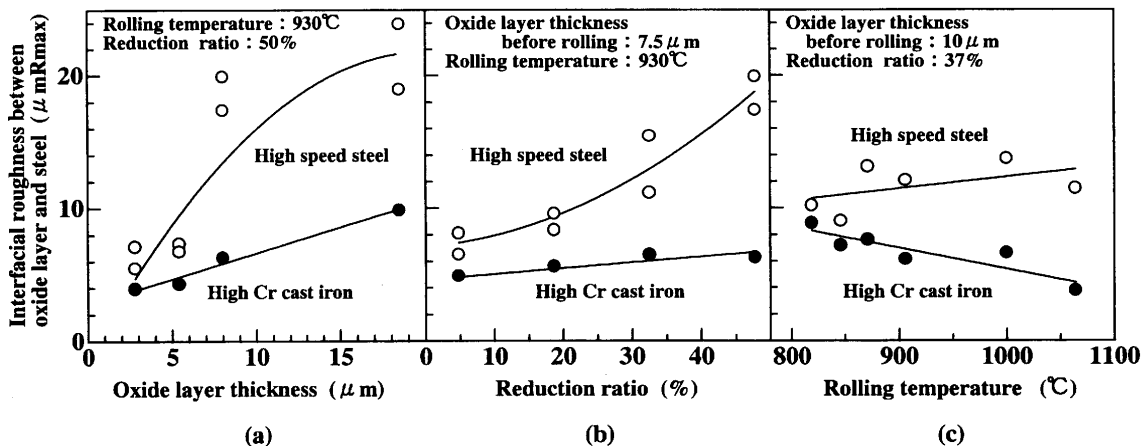


Fig. 11. Effects of (a) oxide layer thickness before rolling, (b) reduction ratio and (c) rolling temperature on oxide layer deformation at No.2 stand.

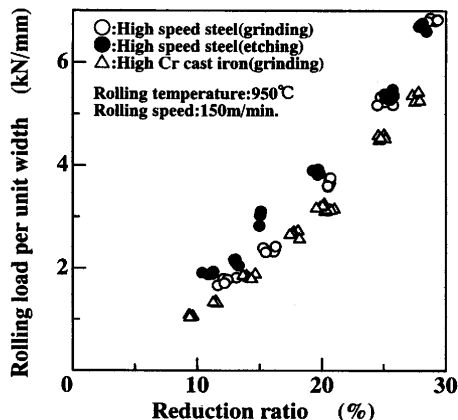


Fig. 12. Effects of roll surface deteriorations on hot rolling load.

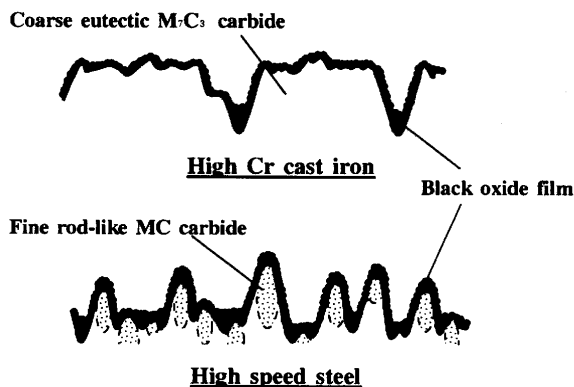


Fig. 13. Schematic illustration of microscopic roll surface deteriorations.

されていると考えられる。

4.2 鋼板スケール疵発生機構

ハイスロールによる熱間圧延時の鋼板スケール疵発生機構をFig.15のように推定した。

すなわち、ハイスロール表面には圧延に伴って、金属組織に起因すると考えられる微細な凹凸が多数発生する。

この微細な凹凸は、ロールバイト内のスリップ領域でロールと鋼板スケールとの間の滑りを妨げ、局部的に固着領域が発生しやすくなると考えられる。そのため、スケールに割れが生じてその部分に地鉄が露出したり、固着したスケールにその前方もしくは後方のスケールが掻き寄せられ、スケールの厚さにむらが生じるといったスケールの不均一な変形を引起し、スケールと鋼板の界面の凹凸化が進行するものと考えられる。スケールが厚くなった部分は、その後の圧延の影響も受けて鋼板に噛込んだ状態となり、スケール疵となる。

この発生機構に基づく鋼板スケール疵防止策としては、ロール材質面では、炭化物の粗大化、基地強化による硬質炭化物突出の影響軽減、操業面では低温圧延による二次スケール発生抑制などが考えられる。また、圧延油による黒皮抑制²⁰⁾なども効果的と考えられる。

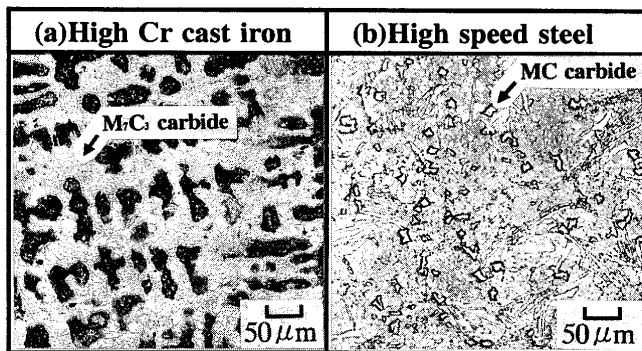


Fig. 14. Microstructures of (a) high Cr cast iron and (b) high speed steel.

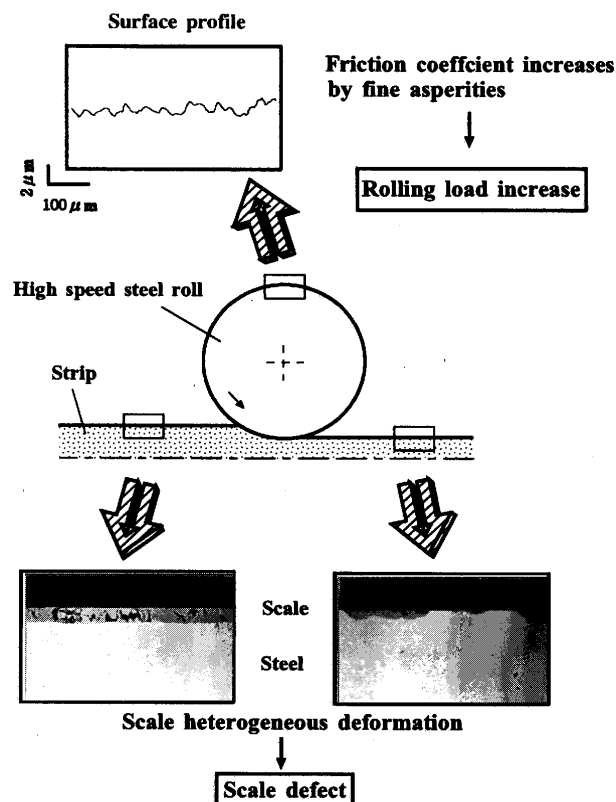


Fig. 15. Rolling load increase and scale defect formation mechanism.

5. 結言

ハイスロールを使用して熱間圧延した際のロール表面形態と鋼板スケール疵との関連性を実験室的な各種モデル圧延試験により調査した結果、以下のことが明らかになった。

(1) 熱間圧延後のハイスロール表面には、硬質炭化物の突出と黒皮によって保護された微細な凹凸が多数存在する。これが圧延時に摩擦を高め、圧延荷重を増加させるものと推定される。

(2) この微細な凹凸が、ロールバイト内において鋼板スケールの均一な変形を阻害し、この不均一な厚みを持ったスケールは、その後の圧延において噛込み性のスケール

疵を形成すると推定した。

(3) 鋼板スケールの不均一変形は、圧延前の鋼板スケールが厚いほど、圧下率が高いほど、鋼板温度が高いほど発生しやすい。

文 献

- 1) 小西政治, 浅田達彦, 黒木啓介, 赤時 恵, 藤田紀久: 材料とプロセス, **5** (1992), 1596.
- 2) 山本徹夫, 中村丈人, 小島誠治, 米沢雅弘: 材料とプロセス, **6** (1993), 516.
- 3) M.Hashimoto, S.Otomo, K.Yoshida, K.Kimura, R.Kurahashi, T.Kawakami and T.Kouga: ISIJ Int., **32** (1992), 1202.
- 4) K.Goto, Y.Matsuda, K.Sakamoto, Y.Sugimoto: ISIJ Int., **32** (1992), 1184.
- 5) 金山信行, 猿渡康隆, 芝尾信二, 西山泰行, 倉橋隆郎: 材料とプロセス, **5** (1992), 1595.
- 6) 関 春彦, 蛭田敏樹, 山下道雄, 今江敏夫, 富永謙二, 小出正人: 材料とプロセス, **9** (1996), 972.
- 7) 伊藤照雄, 金山信行, 増田義行, 川上 保, 橋本光生: 材料とプロセス, **9** (1996), 964.
- 8) 大畑拓己, 服部敏幸, 縄田良作: 材料とプロセス, **7** (1994), 506.
- 9) 白岩俊男, 松野二三郎, 田頭 一: 鉄と鋼, **57** (1971), 823.
- 10) 荒谷省一, 内田 秀, 山本普康, 阿高松男: 材料とプロセス, **5** (1992), 1598.
- 11) 荒谷省一, 井上 剛, 内田 秀, 濱渦修一, 山本普康: 材料とプロセス, **10** (1997), 1076.
- 12) 大畑拓己, 服部敏幸, 佐野義一, 縄田良作, 木原諄二: 材料とプロセス, **5** (1992), 1597.
- 13) 小出太郎, 後藤邦夫, 芝原 隆: 材料とプロセス, **7** (1994), 1364.
- 14) 加藤 治, 松本紘美, 大貫 輝, 中島浩衛: 第31回塑性加工連合講演会講演論文集, (1980), 335.
- 15) 後藤邦夫, 小出太郎, 芝原 隆, 益居 健: 第45回塑性加工連合講演会講演論文集, (1994), 383.
- 16) 後藤邦夫, 小出太郎, 佐々木強, 芝原 隆: 材料とプロセス, **9** (1996), 976.
- 17) 木原諄二, 銅屋公一, 中村一元, 吉原達夫, 佐野義一: 鉄と鋼, **69** (1983), 782.
- 18) 小出太郎, 後藤邦夫, 佐々木強, 岡田 光, 芝原 隆, 杉本純, 喜多孝夫: 第46回塑性加工連合講演会講演論文集, (1995), 125.
- 19) 岡田 光, 深川智機, 石原晴彦, 岡本 篤, 吾妻正敏, 松田行雄: 鉄と鋼, **80** (1994), 849.
- 20) 後藤邦夫, 芝原 隆: 材料とプロセス, **7** (1994), 1365.