

熱間圧延用補強ロールのスポーリングに関する検討

技術報告

大小森義洋*・北川幾次郎*・篠塚 啓吾*²
宮本 立三*²・矢崎 誠一*²・井上 睦彦*²

Study on Spalling of Hot Strip Mill Backup Roll

Yoshihiro OHKOMORI, Ikuzi KITAGAWA, Keigo SHINOZUKA,
Ritsuzo MIYAMOTO, Seiichi YAZAKI and Mutsuhiko INOUE

Synopsis:

Spalling phenomena of backup roll of a hot strip mill and their prevention are discussed. Most of spalling phenomena are attributable to either of the following two causes.

- 1) Excessive fatigue, which occurs mainly at barrel edges due to an increased contact stress resulting from uneven local wear of a roll barrel.
- 2) A surface crack which is caused by a thermal shock resulting from a mill accident or roll-slip and by propagation of still remaining cracks after dressing.

Accordingly, prevention of spalling should be achieved by both of improved roll property and proper maintenance. The results of the experiments in laboratory and the actual mill operation showed that wear resistance and fatigue property were improved by increasing C and Cr contents and hardness of roll. And it was revealed that reduction of undissolved carbide was effective to improve thermal shock resistance, K_{IC} and fatigue property. Backup roll specifications, however, should be made with consideration of the mill conditions such as operating condition, material and hardness of work roll. Roll maintenance also is important. Detection and perfect removal of a surface crack is essential, in addition to proper dressing depending on the mill conditions.

Key words: steel; backup roll; wear; fatigue; spalling; thermal shock; fracture toughness.

1. 緒 言

鉄鋼各社においては、圧延設備の近代化とあわせてコストミニマム操業生産に対し、非常な努力がなされつつある。特に、熱間圧延においてはスケジュールフリー圧延の増加、6 Hi ミル、クロスミルの導入などが行われている。このため、ロールの受ける負荷はますます苛酷になりつつある。本報では、熱間圧延用補強ロール（以下熱延用 BUR と略す）の耐スポーリング性について実機ロールのデータと基礎実験データの両面から検討した結果について述べる。

2. スポーリングの発生原因と材質特性の関係

本来、スポーリング現象は BUR と作動ロール（以下 WR と略す）とのころがり接触による疲れによつて生ず

る現象¹⁾であるが、実機熱延用 BUR のスポーリングは、その原因を次の二つのタイプに大別することができる。

(1) ロール材のころがり疲れによるもの。

(2) 圧延時の板スリップ事故などを含めた通板時の熱衝撃によつて発生したクラックの進展によるもの。

2・1 ロール材のころがり疲れによるスポーリング

熱延用 BUR のスポーリングの大半は、胴端部に発生している（これをエンドスポーリングという）。このエンドスポーリングについて実機 BUR のデータをもとに考察した。Fig. 1 に、A 熱延工場仕上圧延機での組替え後の BUR の種々のプロフィールを示す。この図に見られるように、ロールの摩耗プロフィールには種々のものがあるが、Photo. 1 に見られるようなエンドスポーリングは、Fig. 2 (a) に見られるような Convex のプロフィールを呈したものでより Fig. 2 (b) に示されるよ

昭和 60 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 5 月 2 日受付 (Received May 2, 1986)

* 日本鑄鍛鋼(株)技術開発部 (Research & Development Department, Japan Casting & Forging Corporation, 46-59 Sakinohama Oaza-Nakabaru Tobata-ku Kitakyushu, 804)

*² 日本鑄鍛鋼(株)戸畑製造所 (Tobata Steel Works, Japan Casting & Forging Corporation)

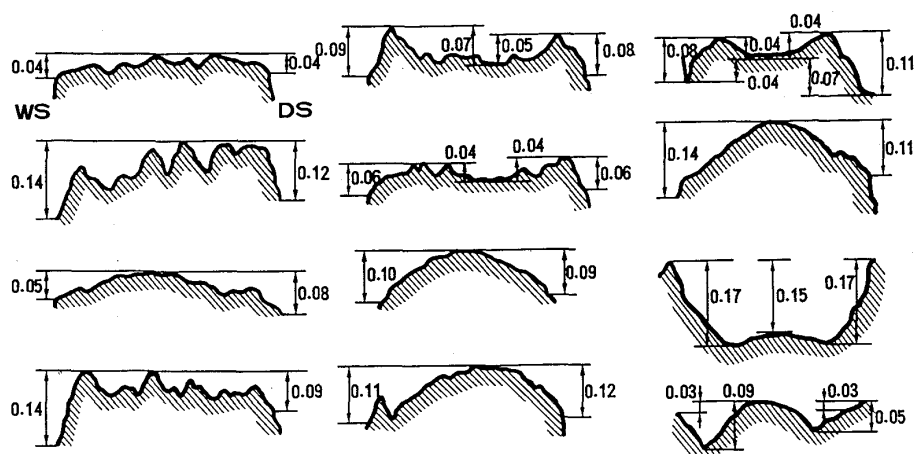


Fig. 1. Profiles of worn backup rolls in A hot strip mill (after used).
Radial distance from surface at work and drive side, Unit: mm

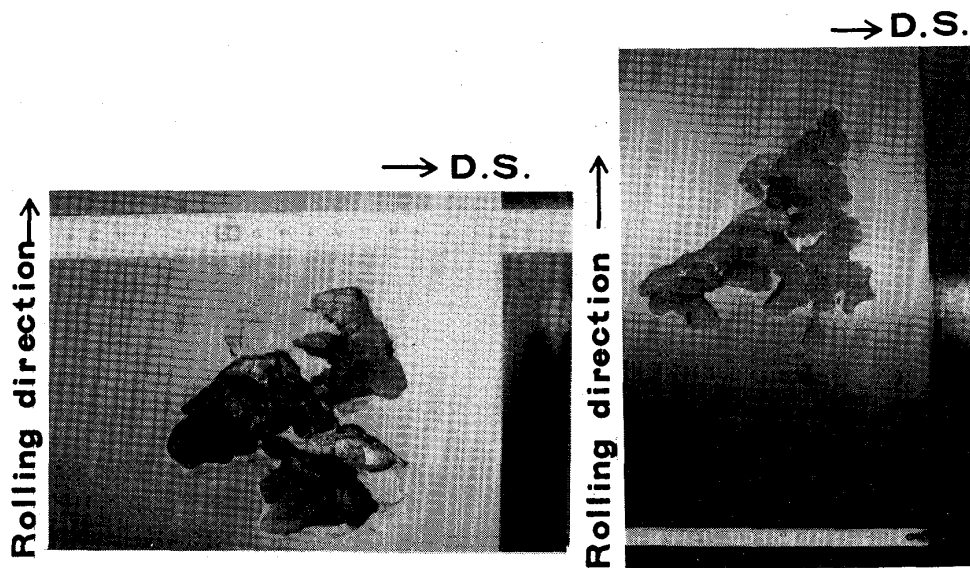


Photo. 1. Spalling of backup roll in A hot strip mill.

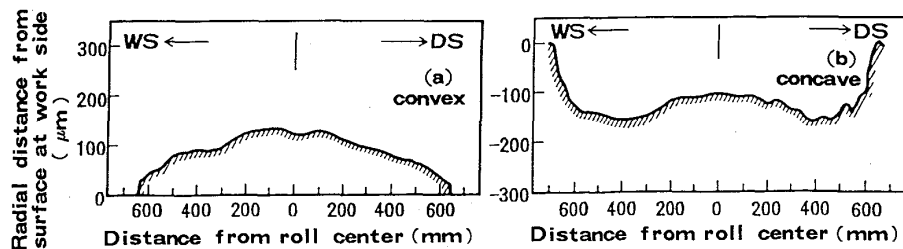


Fig. 2. Profiles of worn backup rolls in A hot strip mill (after used).

うな Concave のプロフィールを、あるいは鬼の角状のプロフィールを呈した BUR に多く発生している。Fig. 3 に、A 熱延工場において一定期限内に発生したスポーリングの頻度を前段と後段のスタンド (以下 Std. と略す) に分けて調べた結果を示すが、前段に比べて後段での発生比率が高い。Fig. 4 に、同工場仕上圧延機各 Std. の 1 回組込みあたりの BUR の回転数の実績と、その時の

プロフィールが BUR と WR とともにイニシャルプロフィールを保つと仮定して求めたヘルツ応力を示す。図に示された F6 Std. のヘルツ応力は、F2 Std. の約 2/3 と低い、実際には Fig. 5 に示すように摩耗プロフィールによつて胴端部に応力が集中し、さらに Fig. 4 に示されるごとく F6 Std. における 1 回組込みあたりの回転数が F2 Std. の約 4 倍にも達するので、それだけ

疲労度が高くなっているものと考えられる。

また、ロールの表層疲労を、Fig. 6 に示すように実機 BUR の表面から各深さでの X 線半価幅を測定して評

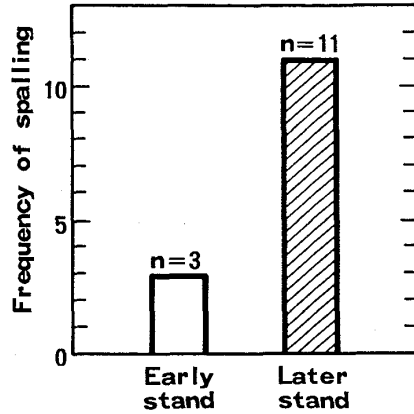


Fig. 3. Frequency of spalling in A hot strip mill.

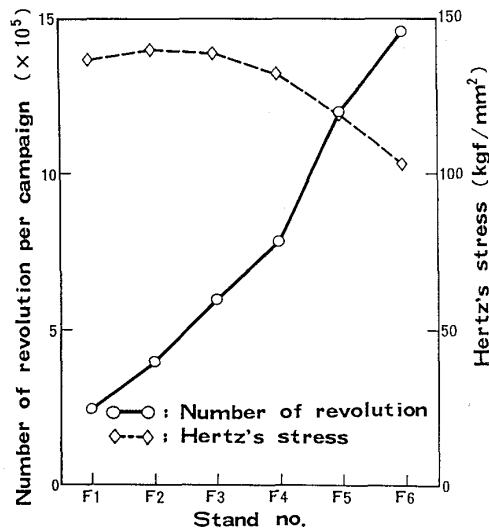


Fig. 4. Number of revolution per campaign and Hertz's stress of backup rolls at each stand in A hot strip mill.

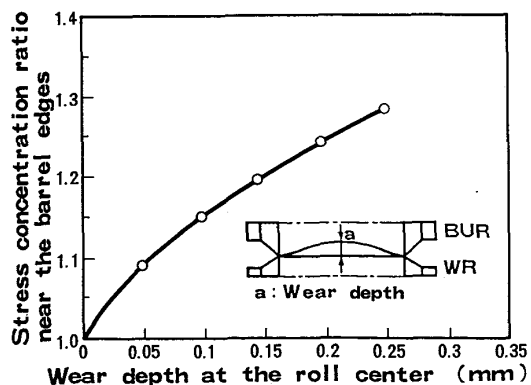


Fig. 5. Relation between wear depth of backup roll and stress concentration ratio near the barrel edges.

価すると、前段と後段の BUR は Fig. 7 のように整理され、半価幅の変化する深さ（疲労層）は、スポーリングの発生頻度と同様に、後段の方が大きい。

この偏摩耗による BUR のスポーリングを防止するには、ロールの特性面とメンテナンスの両面からの対応が必要である。まず BUR 材は、摩耗、ころがり疲れに対して優れた特性を有していなければならない。これらの

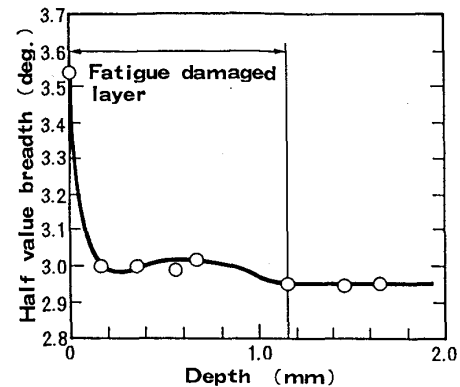


Fig. 6. Changes of half value breadth in the sub-surface (X-ray diffraction method).

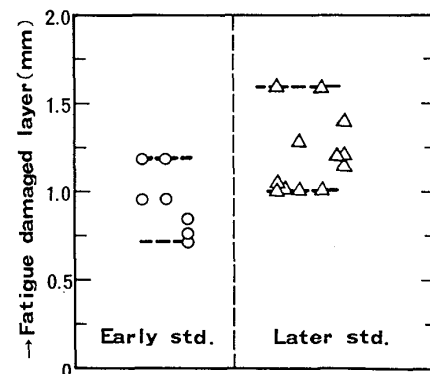


Fig. 7. Fatigue damaged layers of backup roll in A hot strip mill (X-ray diffraction method).

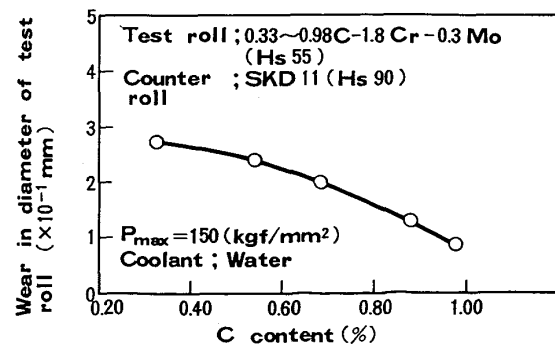


Fig. 8. Relation between C content and wear in diameter after spalling²⁾.

特性は、化学組成、組織およびかたさによつて決められる。摩耗に対するロール材質の関係の一例として Fig. 8²⁾ を示すが、C 量が高いほど、摩耗量は少なくなっている。なお、本試験は、3 重ロール試験機により行われた³⁾。また、摩耗と Cr 量との間にも、Fig. 9 に示すような関係が見られ、Cr 量が高いほど摩耗量は少なくなっている。次に、B 熱延工場における BUR の摩耗量と かたさとの関係を Fig. 10²⁾ に示す。調査期間が比較的長期にわたっているため、この間の操業条件の変化はあるが、かたさと摩耗量との間には明瞭な相関関係が認められる。

また、Fig. 11²⁾ は、C 熱延工場仕上圧延機各 Std. ごとの BUR の単位摩耗量あたりの圧延量 (t/mm) 比を示すが、後段ロールの摩耗が大きい。同工場では仕上 4 Std. までの前段用 WR にはアダマイトを、5 Std. 以降の後段にはハイニッケルグレン铸铁を使用しており、これは、圧延荷重、BUR 転動回数とともに WR 材質の影響も大きいことを示している。

Fig. 8²⁾ と同じ試験方法により求められたスポーリング寿命と C 量との関係を Fig. 12⁴⁾ に示すが、ここでのスポーリング寿命は、ロールの表面にスポーリングが

発生した時の転動数を意味し、C 量の増加とともにスポーリング寿命は長くなる。しかし、0.67% 以上になると飽和傾向を示すとともに、ばらつきが大きくなっている。竹内⁴⁾らは、この現象について電顕観察を行っており、炭化物量は C 量の増加とともに多くなっているが、0.67% 以上では顕著な差は認められていない。特に 0.53% 以下の低炭素材では、炭化物の存在しないフェライト地が認められ、0.67% 以上の高炭素材と異なっていることを述べており、この図は、適量な炭素量が必要であることを示唆している。Fig. 13 は、スポーリング寿命と かたさとの関係を調べた結果である。

試験に供した材料は、組織をマルテンサイトとベイナイトとの混合組織とし、かたさは焼もどしによつてショアーかたさ HS 65, 70 の 2 水準に調整した。なお、縦軸の $\max. \tau_{45^\circ}$ は、座標をロールの半径方向に x 、接線方向に y 、軸方向に z とした場合、接触面の中心線上 ($y=0$) において、 x 軸および y 軸に 45 度の傾きをなす平面内に生ずるせん断応力の最大値で、その値は、 $\max. \tau_{45^\circ} = 0.301 P_{\max}$ である。

Fig. 13 の結果から、試験材のかたさだけでなく、相手材のかたさまでが、スポーリング寿命に関係しており、

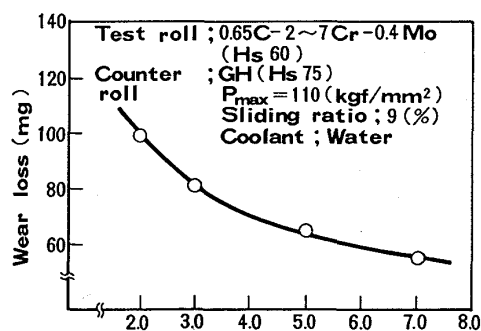


Fig. 9. Relation between Cr content and wear loss after 3×10^5 cycles.

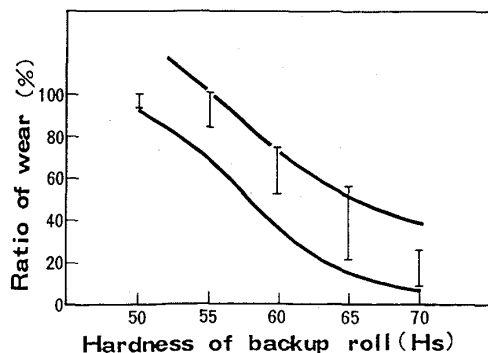


Fig. 10. Relation between hardness of backup roll and ratio of wear in B hot strip mill²⁾.

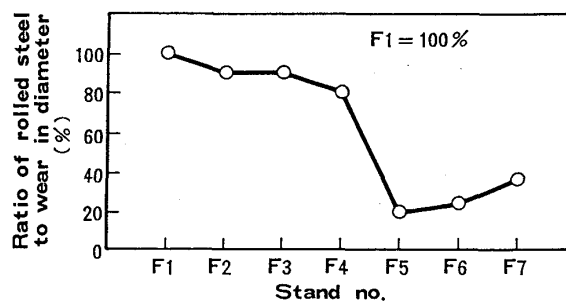


Fig. 11. Ratio of rolled steel to wear in diameter at each stand in C hot strip mill²⁾.

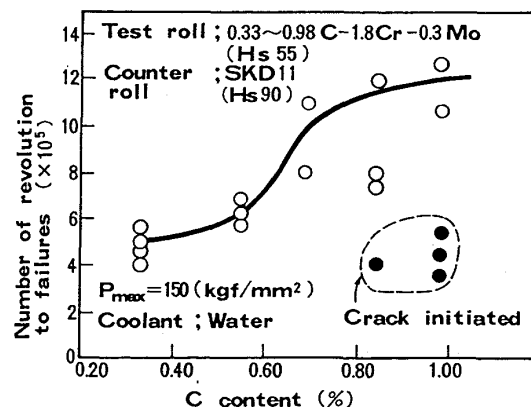


Fig. 12. Relation between C content and number of revolution to failures⁴⁾.

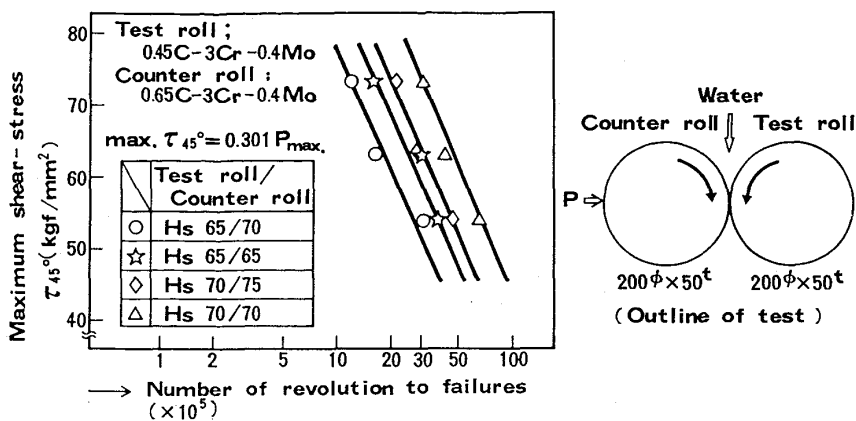


Fig. 13. Relation between hardness combination and number of revolution to failures.

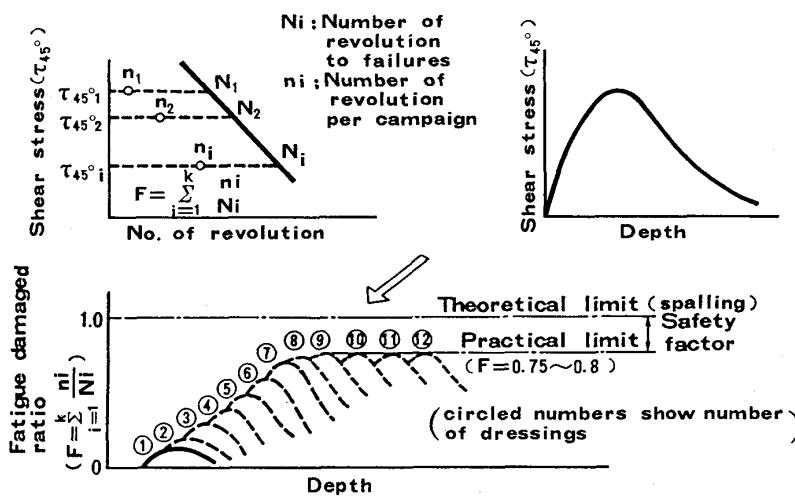


Fig. 14. Distribution of fatigue damaged ratio along the roll radius.

BUR はかたく、WR のかたさの低い方が、BUR のスポーリング寿命が長くなることがわかる。

以上の結果から、摩耗、ころがり疲れに対しては、C、Cr などの合金添加量を多くし、かつこれらの最適組合せのもとで実機の使用条件に適合した高硬度にすることが望ましいと考えられる。

さらに、スポーリングに対しては、ロールのメンテナンスも材料特性と同様に大きなウェイトを持っている。組替え後 BUR は、表層に蓄積した疲労層を除去するために改削される。この改削による疲労度の管理は、ロール原単位の面からも重要である。ロールの改削量の管理は、一般に、次のような方法によっておこなわれている。

(1) X線による半価幅の測定結果より管理する方法⁵⁾

(2) Miner 則を用いた計算によるロールの径方向、および軸方向の疲労損傷分布から疲労度を管理する方法

(3) かたさ(加工硬化)により管理する方法。

(4) さらに、これらをベースとして実機の経験則により各ミルに応じた管理基準が使われている。

この中で、(2)の計算例について紹介する。

計算に用いた仮定を次に示す。

①ロールの疲労を支配する力学因子は、 $\tau_{45^\circ} = 1/2(\sigma_x - \sigma_y)$ であるとする。

②ロールのスポーリング寿命については、Miner 則が成立するものとする。

③1回組込み時の転動数、および組替え後の消耗量は毎回一定とする。なお、ここでは、消耗量=摩耗量+改削量とする。

このモデルを Fig. 14 に示す。疲労度 (F) < 1 になるように (通常は安全率を考慮して $F=0.75 \sim 0.80$) を選んでロールを使用すれば、理論的にスポーリングが防止できると考えられる。また、D熱延工場での BUR の実績消耗量と、本計算モデルにより求めた F が 0.75 で飽和するときの消耗量を、併記して Fig. 15 に示す。各 Std. での実績データの範囲は、実機ロールのばらつきを示し、計算値の範囲は WR、BUR とともに新径、廃棄径の場合の二通りの結果を示す。

2.2 熱衝撃クラックを起点とするスポーリング

ロールの受ける負荷がますます苛酷になるにつれ、絞り込み、あるいはスリップ等によつて生ずる熱衝撃ク

ラックを起点とするスポーリングが問題となる。

このクラックは、温度上昇に伴う熱膨張が拘束されたために生じた塑性ひずみが、冷却の際に大きな引張応力に変換されたために発生すると報告されている⁶⁾。

Photo. 2 に、E 熱延工場で BUR 胴端に発生したスリップ痕の例を、Photo. 3 にその箇所のミクロ組織写

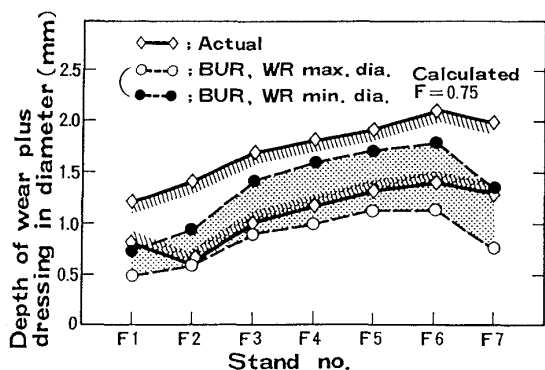


Fig. 15. Relation between actual and calculated depth of wear plus dressing of backup roll in D hot strip mill.

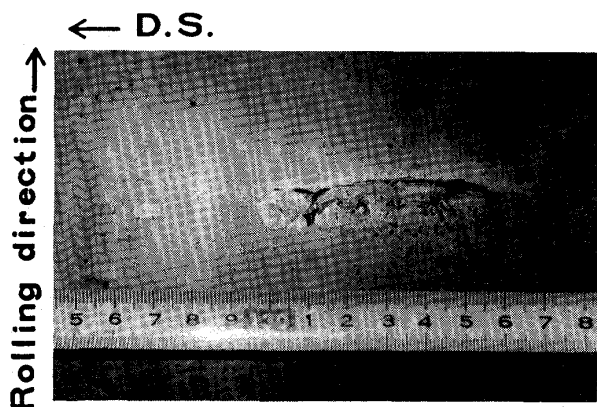


Photo. 2. Slip mark on backup roll in E hot strip mill.

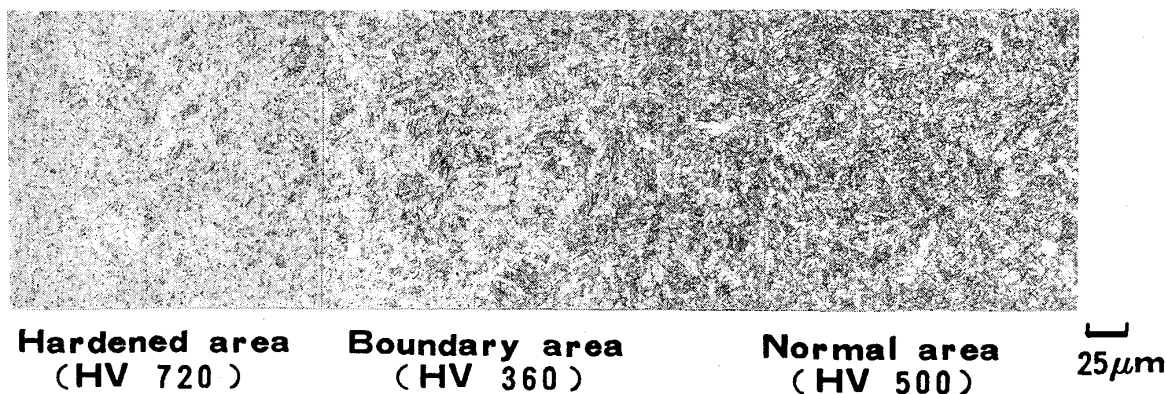


Photo. 3. Photomicrograph of slip mark of backup roll in E hot strip mill.

真を示す。スリップ痕域のかたさは、ピッカースかたさ HV 720 (荷重 5 kg, HS 換算 83) に達しており、正常部の HV 500 (HS 66) に比べて異常に高く、かつ組織はマルテンサイトになっており、変態点以上に急熱後急冷されたことを示している。また境界部は、かたさが HV 360 (HS 50) と低くなっており、焼もどしを受けている。このように、熱衝撃被害部にはその箇所の到達温度により組織、かたさなどに変化が見受けられる。

Photo. 4 に、F 熱延工場で、BUR の研削中に胴端部に発見された熱衝撃によるクラックの例を Photo. 5 に、C 厚板工場で見られたころがり疲れによる BUR のクラックの例を比較して示す。ころがり疲れによるクラックは複雑な形状を呈しているが、熱衝撃によるクラックは比較的シャープで、しかもその方向は、軸方向に平行であるという外観上の特徴をもっている。

Photo. 6 に、F 熱延工場で、熱衝撃によるクラックを起点として発生したと考えられる BUR のスポーリング破面を示す。このタイプのクラックは、比較的シャープなためか、スポーリングによる被害が大きいため、防止には、クラックを取り残して Std. に組み込むことがないように、改削時完全に検出し、除去しなければならない。

このような熱衝撃により、クラックが発生したとしても、その深さが浅くてすむロールの材質特性が要求されている。熱衝撃によるクラックの実験室的シミュレーションには種々の方法があるが、ここでは、Fig. 16 に示すような試験機および試験条件で、熱延用 BUR を対象として実験を行つた事例を紹介する。

Fig. 17 に、炭化物の面積率と最大クラック深さとの関係を示す。この結果から、炭化物の面積率の小さい方が、最大クラック深さは小さい傾向にある。さらに、かたさ (焼もどし温度) と最大クラック深さとの関係を、

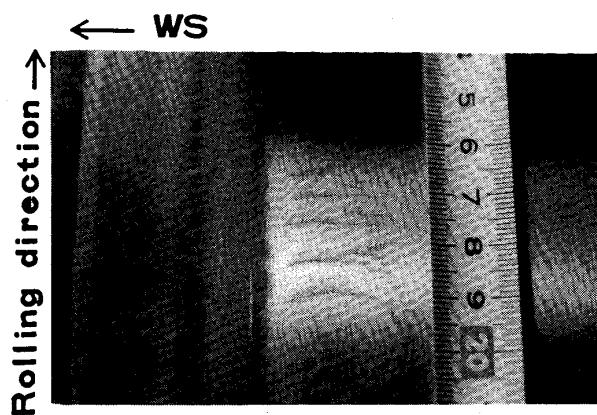


Photo. 4. Cracks on backup roll in F hot strip mill.

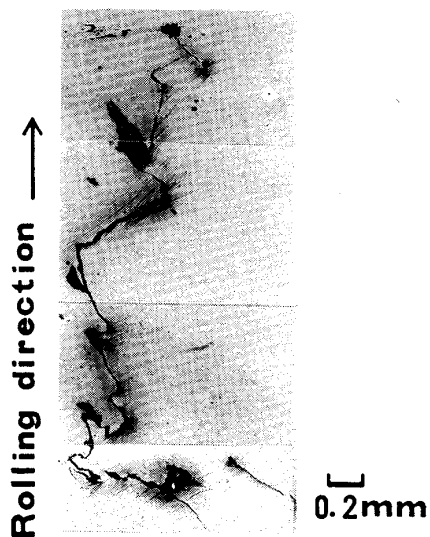


Photo. 5. Cracks on backup roll surface in C plate mill.



Photo. 6. Appearance of spalling of backup roll in F hot strip mill.

Fig. 18 に示す. この結果から, かたさが低くなる (焼もどし温度が高くなる) に従つて, 最大クラック深さは小さくなる傾向にある. 前節で, 摩耗, ころがり疲れについては, かたさの高いものがその特性に優れていることを述べたが, この熱衝撃試験の結果を考えると, BUR は実機の使用条件を考慮して, 適正な材質を選ぶ必要がある.

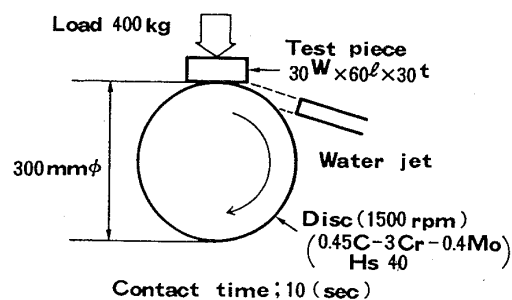


Fig. 16. Heat shock testing apparatus.

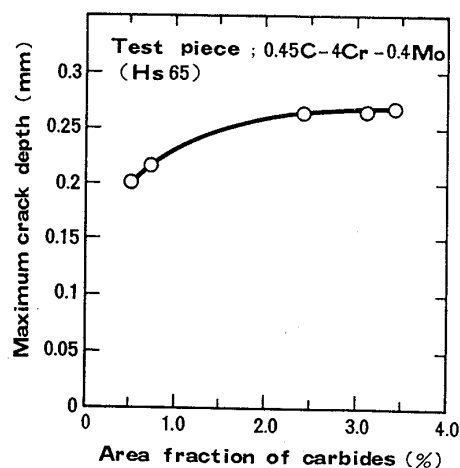


Fig. 17. Relation between area fraction of carbides and maximum crack depth.

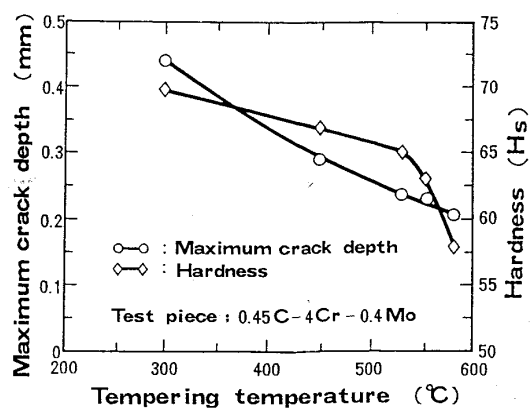


Fig. 18. Relation between tempering temperature, hardness and maximum crack depth.

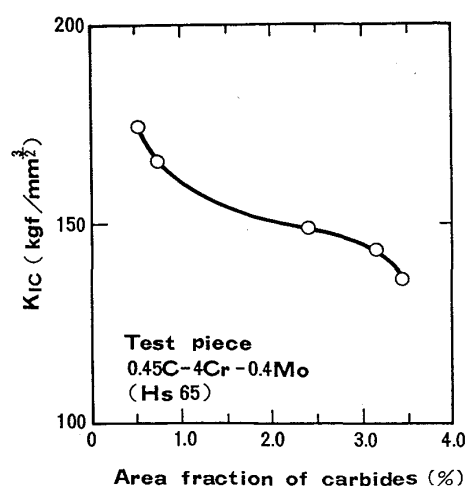


Fig. 19. Relation between area fraction of carbides and K_{IC} .

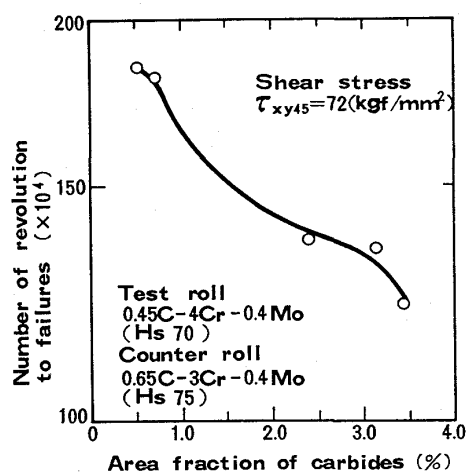


Fig. 20. Relation between area fraction of carbides and number of revolution to failures.

3. 破壊靱性値 (K_{IC}) とスポーリング寿命

Fig. 12⁴⁾ に、C量の増加によりスポーリング寿命が向上し、C量があるレベルに達すると、スポーリング寿命は長くなることを示した。この理由がMatrixの強化にあるのか、炭化物量の増加、あるいは両者の相乗効果によるものかについて明確にされていない。したがって、ここでは各因子の効果を調べるため、熱延用BURを対象とし、同一鋼種にて炭化物の面積率を変え、スポーリング寿命との関係を調べた。また同様にして、近年耐スポーリング性評価の一つのパラメーターとしてロール材

に適用されている破壊靱性値 (K_{IC})⁷⁾ についても調べた。その結果を Fig. 19 および Fig. 20 に示す。なお、 K_{IC} 値は ASTM-E399 に準拠して、WOL 型 1T 試験片により求めた。これらの結果から、炭化物の面積率の小さい方が K_{IC} 値が高く、またスポーリング寿命も長くなっていることがわかる。この傾向は、炭化物の面積率を小さくすることにより、Matrix が強靱化された効果と考えられ、スポーリング寿命には Matrix の効果が、炭化物の効果よりも大きいことがわかった。

これらの結果より、破壊靱性値とスポーリング寿命との間には、相関があると考えられる。

4. 結 言

熱延用 BUR の耐スポーリング性について、実機ロールのデータと、基礎実験データから検討を行った。

実機熱延用 BUR のスポーリングは、その原因を次の二つのタイプに大別することができる。

(1) ロール材のころがり疲れ、特に偏摩耗による胴端部での接触応力の増大によるもの。

(2) 圧延時の板スリップ事故を含めた通板時の熱衝撃によって発生したクラックの進展によるもの。

(1) のスポーリング防止には、WR との適正な BUR かたさの組合せ、圧延潤滑などの実機の使用条件を考慮した摩耗、ころがり疲れ特性に優れたロール材質の開発が必要である。(2) のタイプについては、熱衝撃特性に優れた材質の開発が必要である。さらに、スポーリングの防止には、ロール改削時のクラックの完全な検出と除去および疲労層を適時に取り除くメンテナンスも、これらの特性と同様に大きなウェイトを持っている。

また、実験結果より破壊靱性値 (K_{IC}) は、耐スポーリング性評価の一つのパラメーターとして考えることができる。

文 献

- 1) 赤堀公彦: 塑性と加工, **6** (1965) 63, p. 329
- 2) 荒金 煉, 林満洲雄: 鉄鋼材料の摩耗 (日本鉄鋼協会鉄鋼基礎共同研究会編) (1984), p. 121
- 3) 横山隆吉, 三浦勝重, 矢崎誠一: 三菱製鋼技報, **2** (1968) 1, p. 10
- 4) 竹内秀光, 林満洲雄, 矢崎誠一: 三菱製鋼技報, **4** (1970) 1, p. 27
- 5) 武智 弘, 難波和郎, 川崎宏一, 藤原圭三: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 85
- 6) 佐藤和紀, 竹内秀光, 三浦勝重, 竹下修一: 塑性と加工, **1** (1969) 101, p. 405
- 7) 宮沢賢二: 鉄と鋼, **65** (1979), S1049