

(技術資料)

耐スポーリング性に優れたCGLスキンパス圧延用ロール鋼

New Roll Steel with Low Spalling-susceptibility for CGL Skin-pass Rolling



藤網宣之*
Nobuyuki Fujitsuna



中嶋宏樹*
Hiroki Nakashima



日野昇一**
Shoichi Hino



坪田隆之***
Takayuki Tsubota



中山武典***^(工博)
Dr. Takenori Nakayama

In CGL (Continuous Galvanizing Line) skin-pass rolling, formation of fine defects on the roll surface and spalling from these fine defects often occur. In order to develop a new roll steel with low spalling-susceptibility for CGL skin-pass rolling, steel composition was evaluated from the viewpoint of suppressing hydrogen embrittlement. It was clarified that spalling-susceptibility was much improved by Ti and/or V addition. In this paper, these improvements are summarized together with their effects on both the reduction of hydrogen introduced into the steel and the reduced diffusivity of hydrogen through the formation of hydrogen-trapping sites.

まえがき = 溶融亜鉛めっきラインのスキンパスロール（以下、CGL スキンパスロールと記す）では、比較的短時間でロール表面にピット、ふくれ疵や微小割れが発生し、場合によっては微小欠陥を起点としたスポーリング現象が発生している。

その原因として、以下の発生メカニズムが考えられている。すなわち、亜鉛めっき鋼板の仕上げを行うスキンパス圧延機の操業では、亜鉛粉の目詰まり防止のため、ロール表面に水（工業用水など）が噴霧されるが、ロール表面に亜鉛粉末の付着が認められる。そのため、水を介するロールと亜鉛との異種金属接触により腐食が生じ、それにともない水素がロールに侵入し、水素脆性により微小割れが発生する危険性が高くなっている^{1),2)}。

これまでに、応力腐食割れ低減やき裂伝播抑制の観点から CGL スキンパスロールのスポーリング抑制策が検討され、低 Cr ロールの採用や残留オーステナイト相の

活用などが行われてきている。

当社では、耐スポーリング性改善を目的として、侵入水素による脆化を抑制するとの観点から、高強度ボルト用鋼などで遅れ破壊低減に効果が認められている Ti, V 添加^{3),4)}を、ロール材に適用可能かを検討した。

1. CGL スキンパスロールにおけるスポーリング発生メカニズム

CGL スキンパスロールにおけるスポーリングは、図 1 に模式的に示すモデルにより起こると考えられる。すなわち、ロール表面では付着した亜鉛と圧延水が共存するため、鉄表面と亜鉛との間で局部電池が形成され、カソード反応により生成した一部の水素がロール中に侵入する。侵入した水素は、ピットや微小クラックなどの応力集中部近傍に拡散濃化し、水素脆化によって亀裂進展が助長される。

本モデルの場合、侵入拡散性水素をトラップし、無害

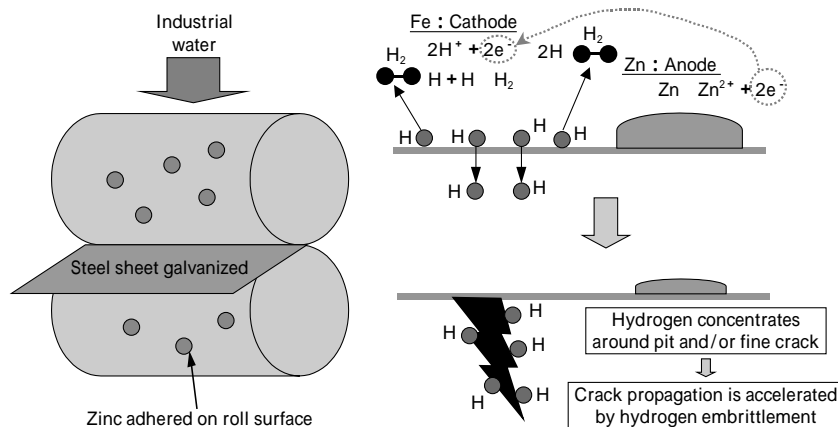


図 1 CGL スキンパスロールにおけるスポーリング発生モデル

Fig. 1 Spalling model on CGL skin-pass roll

*鉄鋼部門 鑄鍛鋼事業部 技術部 **鉄鋼部門 鑄鍛鋼事業部 鑄鍛鋼営業部 ***技術開発本部 材料研究所

化することにより脆化を抑制できると考えられ、水素トラップサイトを形成すると考えられている Ti, V の添加が有効と推察される。

2. 評価試験方法

2.1 試験成分系および試験材

CGL スキンパスロールにおけるスポーリング抑制法として、Cr 量低減や残留オーステナイトの活用がある。そこで、基準材を 3%Cr 鋼（当社鋼種名 KOW4）サブゼロなしとし、Ti, V 添加効果を検討した。成分系を表 1 に示す。

表 1 記載の 3 鋼種について、50kg 真空誘導炉で小型鋼塊を製造し、2S 相当の鍛錬を行った。鍛錬後、KOW4 標準の調質処理を施した後、焼入れ・焼戻しを行い硬度を HV = 780 に調整し、供試鋼とした。

2.2 評価試験

水素脆化特性は SSRT (Slow Strain Rate Technique) 試験により評価した。SSRT 試験は、極低ひずみ速度 ($1 \times 10^{-5} \sim 10^{-6} \text{sec}^{-1}$) で引張ることにより、水素の拡散を加速させ、一般的な遅れ破壊試験よりも材料の水素による脆化度合を迅速、敏感に評価できる試験方法である。試験片は図 2 に示すように、平行部径 4mm、長さ 10mm とし、実機ロールにおける亜鉛付着を模擬するため、写真 1 (a) に示すように、平行部両端部に亜鉛めっきを行った。亜鉛めっきした試験片を、写真 1 (b) のように当社加古川製鉄所 CGL より採取した圧延水中に最

表 1 試験ロール材の成分系
Table 1 Composition system of roll steel (mass%)

	C	Mn	Cr	Ti, V	Others
KOW4	0.85	0.50	3.4	-	Si, Ni, Mo
KOW4 + Ti	0.85	0.50	3.4	Bit-Ti	Si, Ni, Mo
KOW4 + V	0.85	0.50	3.4	Bit-V	Si, Ni, Mo

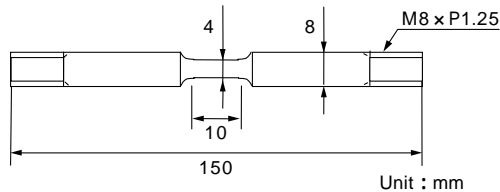


図 2 SSRT 試験片形状
Fig. 2 Specimen of SSRT test

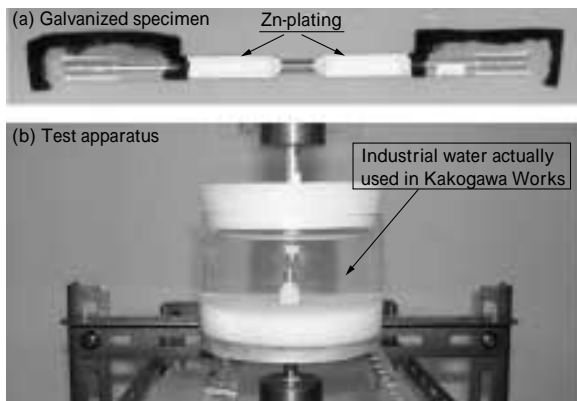


写真 1 SSRT 試験状況
Photo 1 Appearance of SSRT test

大 28 日間浸漬し、圧延水に浸漬した状態で SSRT 試験を行い、脆化状況を評価した。

3. 評価試験結果

3.1 スポーリング感受性に及ぼす Ti, V の効果

圧延水中浸漬によるスポーリング感受性（水素割れ感受性）の変化を図 3 に示す。ここで、スポーリング感受性は、浸漬後の破断伸びと大気中での破断伸び比を用いて (1) 式により定義される指標である。

$$\text{スポーリング感受性} = 1 - (E_H/E_0) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 E_H = 圧延水中浸漬後の破断伸び

E_0 = 大気中での破断伸び

図 3 より、基準材の 3%Cr 鋼 (KOW4) では、浸漬日数の増加につれて脆化が進み、スポーリング感受性が高くなるのが分かる。一方、Ti, V 添加鋼では、無添加の KOW4 と比較してスポーリング感受性が低下し、Ti, V の添加により脆化が抑制されることが確認された。浸漬後 7 日程度までは 3 鋼種とも脆化し、スポーリング感受性が高くなるが、それ以降は、Ti, V 無添加鋼では感受性が高くなるのに対し、Ti, V 添加鋼では感受性は増大せず、脆化の進展は認められない。

この結果より、CGL スキンパスロールの耐スポーリング性改善に、Ti, V の添加が有効であると考えられる。

3.2 Ti, V の脆化抑制効果

前節で示したように、Ti, V 添加によりスポーリング感受性が低減されることが確認された。そこで、Ti, V 添加のスポーリング感受性低減効果をより明確にするため、各鋼種の水素侵入量を評価した。

圧延水中浸漬ともなう鋼中水素量の変化を図 4 に示

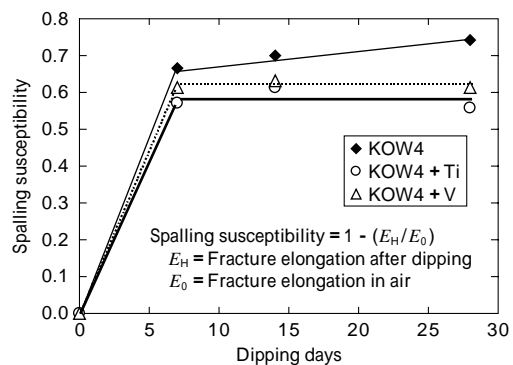


図 3 スポーリング感受性の鋼種による変化
Fig. 3 Change of spalling susceptibility by steel type

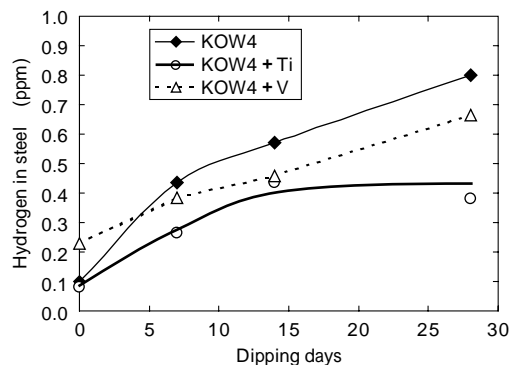


図 4 浸漬日数による鋼中水素量の変化
Fig. 4 Change of hydrogen in steels by dipping days

す。図より、Ti、Vの添加により、圧延水中浸漬による鋼中水素の増加量が低減している。本結果より、Ti、Vの添加は水素の鋼中への侵入を抑制していることが確認された。

また、Ti、Vの添加によりTi炭化物やV炭化物などの炭化物が析出し、これらが水素トラップサイトとなり、拡散性水素量を低減し、ピットや微細クラックなどの応力集中部近傍への水素の拡散濃化が抑制されることにより、水素脆化抑制に寄与すると考えられる。また、水素トラップ能が高いほど水素の拡散放出温度が高くなることから、水素放出挙動の比較によって、水素トラップ能を比較することができる。そこで、基準鋼のKOW4とTi添加鋼について、14日間圧延水浸漬後の水素放出挙動を調査した。試験は、圧延水浸漬により水素を導入した試験片を加熱し、温度上昇にともない拡散放出される水素量を分析した。分析結果を図5に示す。

図より、Ti添加により水素放出ピーク温度が高温側にシフトしている。この結果は、Ti添加により水素がより高温域までトラップしていることを示しており、Ti添加により拡散性水素量が低減していると推察される。

ここで、鋼中水素量とスポーリング感受性の関係をまとめると図6のようになる。図より、Ti、V添加により鋼中水素量とスポーリング感受性の関係が、低水素・低スポーリング感受性（左下）側に明確にシフトしている。すなわち、Ti、V添加によるスポーリング感受性の低減は、鋼中水素量低減効果と水素トラップサイト形成によ

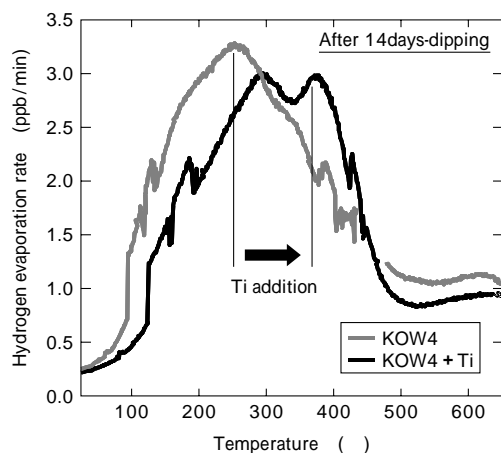


図5 Ti添加による水素放出曲線の変化

Fig. 5 Change of hydrogen evolution curve by Ti addition

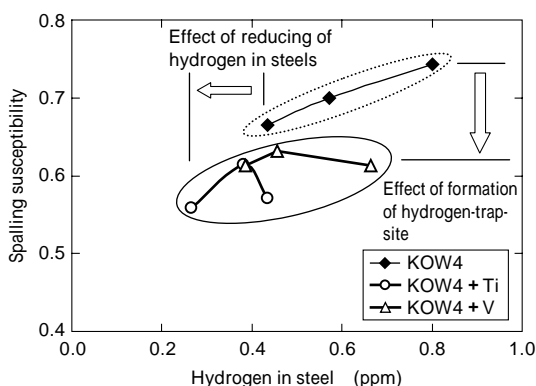


図6 鋼中水素量とスポーリング感受性の関係

Fig. 6 Relation between hydrogen in steels and spalling susceptibility

る拡散性水素量低減効果の複合効果によるものと考えられる。

3.3 遅れ破壊防止効果

以上のように、3%Cr鋼（KOW4）にTi、Vを添加することにより、SSRT試験で評価されるスポーリング感受性が低減されることが明らかとなった。

これまでのCGLスキンパスロールの研究では、4点曲げによる遅れ破壊試験でスポーリング感受性が評価されている。そこで、4点曲げによる遅れ破壊試験を行い、割れ発生に及ぼす効果を検証した。試験材は3%Cr鋼（KOW4）とTi添加鋼として、写真2に示すように、1400MPaの応力を負荷した状態で下記水溶液中にポテンシオスタットを用いて定電位保持し、試験片表面でのカソード反応による水素チャージを連続的に行いながら、破壊するまでの時間を比較した。

溶液：0.5mol/l H₂SO₄ + 0.01mol/l KSCN

電位：-700mV

試験結果を図7に示す。図に示すように、Ti添加により破壊までの時間が延長され、静的負荷状況下においても割れ感受性が低減していることが確認された。

むすび = CGLスキンパスロールのスポーリング低減を目的とし、3%Cr鋼をベースとしての水素脆化割れに対するTi、V添加効果を検討した結果、下記のことが明らかとなった。

- Ti、V添加によりスポーリング感受性が低減する。
- スポーリング感受性低減効果はTiの方がわずかに大きいですが、V添加でも十分な効果を有している。
- Ti、V添加によりスポーリング感受性低減は図8に示すモデルで説明できる。すなわち、水素侵入を抑



写真2 4点曲げによる遅れ破壊試験の試験片設定状況

Photo 2 Specimen condition in delayed fracture testing by 4-point bending

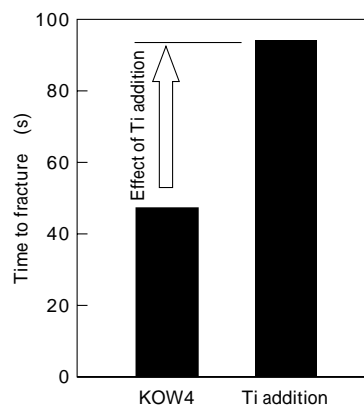


図7 遅れ破壊試験結果

Fig. 7 Result of delayed fracture testing

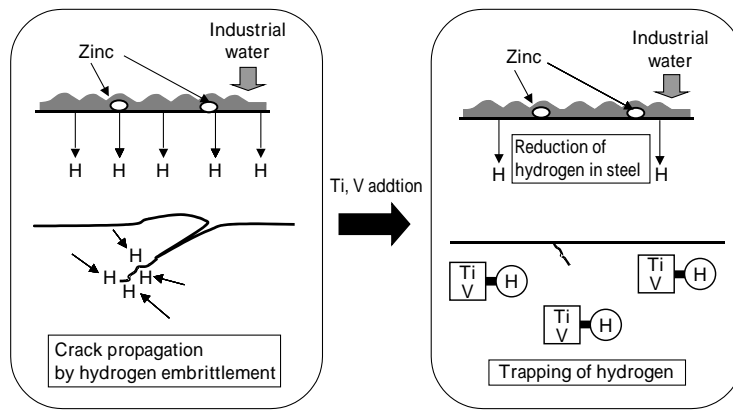


図8 CGL スキンパスロールにおけるスポーリング抑制メカニズム
 Fig. 8 Suppressing model for spalling on CGL skin-pass roll

制する効果と、侵入した水素をトラップして水素脆化を抑制する効果の複合効果によるものと推察された。

このように、スポーリング感受性低減効果が大きいことから、一部のユーザにサンプル出荷を行い、実機での評価試験を実施している。今後、実機評価試験を基にTi,V 添加量の最適化を図りつつ商品化を進めていく。

参考文献

- 1) 山根康義ほか：鉄と鋼，Vol.70, No.13 (1984) p.40.
- 2) 坂下修一ほか：三菱製鋼技報，24 (1990) p.22.
- 3) 漆原 亘ほか：材料とプロセス，14 (2001) p.647.
- 4) 漆原 亘ほか：材料とプロセス，13 (2000) p.1378.