

討13 冷間圧延におけるヒートストリーク発生機構の検討

川崎製鉄(株)技術研究所 ○北村邦雄、鐘田征雄、中川吉左衛門

千葉製鉄所 青木茂雄、松田 修、坂上武雄

1. 緒言

薄鋼板の冷間圧延においてヒートストリークあるいはヒートスクラッチなどと称される表面損傷の発生は、品質、歩止りの低下、圧延能率の低下、圧延油やロール原単位の上昇等の悪影響を与えている。

また、ミルクリーン圧延油開発の一つのネックポイントともなっていることから大きな問題となっており、このヒートストリークの発生機構の解明とその防止技術の確立が強く要求されている。

ヒートストリークに関する研究としては、テストミルを用い潤滑油や圧延条件の影響を検討した報告^{1)~3)}があるが、「ヒートストリークの発生原因が何であるか」という発生機構の検討はほとんどなされていない。

本報告では、千葉製鉄所4スタンドタンデムミルにおいてヒートストリーク発生実験を行ない、ヒートストリーク発生機構について検討したので報告する。

2. ヒートストリークの発生状況

2.1 ヒートストリークの外觀

実機4スタンドタンデムミルの№3スタンド下ワークロールに発生したヒートストリークを写真1に、圧延材側のヒートストリークを写真2に示した。これはヒートストリークがかなり成長した段階のものである。このように顕著なヒートストリークが発生すると製品は表面品質の点から格落ちまたは不良品となるだけでなく、ロールにはミクロ的な熱クラックが発生し、1回当たりのロール研削量を増加させるなどロール原単位を大幅に上昇させる。

2.2 ヒートストリークの発生状況

実機操業観察からヒートストリークの発生には次のような傾向がある。(1)薄物ほど発生率が高い。(2)総圧下率やスタンドでの圧下率が高いほど発生率が高い。(3)高圧延速度になるほど発生する。(4)上側ワークロールに比較し、下側ワークロールに発生しやすい。(5)圧延油の潤滑性の影響が大きい。

4スタンドタンデムミルにおいてヒートストリークが多発した時期のサイクル別、スタンド別の発生状況を図1に示した。厚物、中番手サイクルは鉱油系の圧延油を使用し、薄物、ブライツサイクルは油脂系の圧延油を使用している。総圧下率の高い薄物になるとヒートストリークが多発していることがわかる。スタンド別に見るとプレコート油のみで圧延している№1スタンドの発生率が最も高く、次いで№3スタンドである。厚物、中番手、薄物サイクルの№4スタンドはダルロールを使用しており圧下率も10%以下であるためヒートストリークが発生していない。

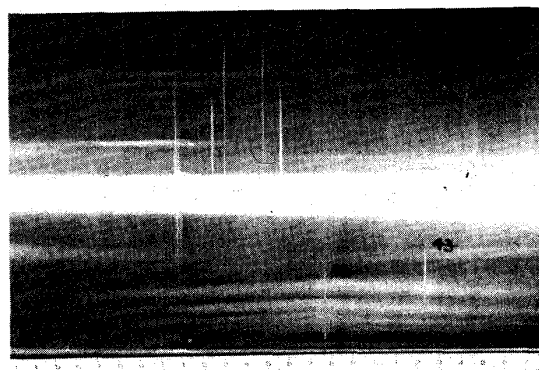


写真1 ロール側のヒートストリーク外觀



写真2 圧延材側のヒートストリーク外觀

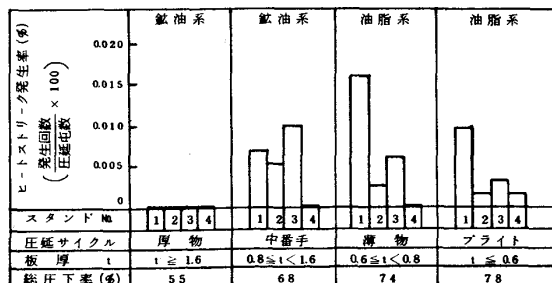


図1 スタンド別、圧延サイクル別のヒートストリーク発生状況

3. ヒートストリーク発生実験による発生機構の検討

3.1 実験方法および条件

実験は実機 4 スタンドタ

ンデムミルにて行なつた。主な実験条件を表 1 に示した。実験材は低炭リムド鋼で母板厚 2.6 mm から 0.38 mm に仕上げた。圧延油は牛脂系で循環給油方式である。

ロールは全スタンドともブライトロールを使用した。圧延速度を図 2 に示すように段階的に増大させ、各圧延速度におけるヒートストリークの発生の有無を停止時にスタンド間でコイルを観察するとともにコイルを巻戻して観察した。圧延スケジュールを表 2 に示した。A スケジュールは通常のスケジュールであり、B スケジュールは No. 3 スタンドにヒートストリークを発生させるため圧下率を 50% と強圧下したものである。この他、No. 4 スタンドでヒートストリークを発生させるため中央部のロールクーラントを切つて、A スケジュールに近い条件でも行なつた。

3.2 ヒートストリーク発生機構の検討

圧延結果の一例を表 3 に示した。最初に A スケジュールで圧延速度を 200 m/min から 1000 m/min まで変化させて実験を行なつたが、ヒートストリークは発生しなかつた。B スケジュールでは圧延速度 620 m/min まではヒートストリークは発生していないが、圧延速度 820 m/min で No. 3 スタンドにヒートストリークが発生した。ヒートストリークは高圧下率、高圧延速度の場合に発生することがわかる。

ヒートストリークの発生原因を追究するために、ロールに発生したヒートストリークの観察を徹底的に行なつたところヒートストリークの先端部に起点が存在することが明らかとなつた。ロールのヒートストリーク起点の代表的な形態の光学顕微鏡写真とそれらの起点よりの発生率を写真 3 に示した。(A) はスクラッチ状の窪み。(B) は円形状の窪み。(C) は凸となつているものである。第 1 回、第 2 回は No. 3 スタンド下ロールに発生したヒートストリークであり、第 3 回は No. 4 スタンド下ロールに

表 1 実験条件

実験材	鋼種寸法	低炭リムド鋼 26/0.38 × 923, 1117
圧延油	基油濃度 温度	牛脂 4.5% 55℃
給油仕様	循環式給油方式	
ワークロール	硬度 粗さ 直径	Hs 90~98 Ra 0.2~0.35 μ 538~589 mm

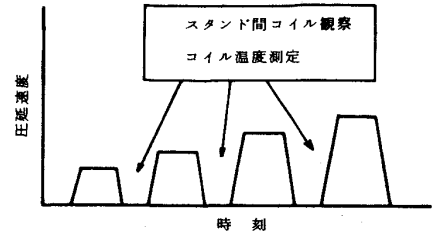


図 2 圧延方法

表 2 圧延スケジュール

スタンド スケジュール	圧下率 (%)			
	1	2	3	4
A	42.8	41.6	41.6	25.0
B	37.5	37.5	50.0	25.0

表 3 圧延結果の一例

スケジュール	スタンド No.	圧延速度 m/min	圧下率 (%)	圧延荷重 t/巻	コイル温度 (℃)	ヒート有無
A	1	246	43	1.18	139	○
	2	452	42	0.94		○
	3	760	41	0.76		○
	4	1029	26	0.82		○
B	1	132	38	1.20	130	○
	2	215	33	1.16		○
	3	444	52	1.01		○
	4	618	28	0.76		○
B	1	179	38	1.18	144	○
	2	292	34	1.15		○
	3	595	51	1.00		×
	4	821	28	0.74		○

○ ヒート発生せず
× ヒート発生

	ヒートストリーク起点の形態	発生率(発生数/全ヒート数)		
		第1回	第2回	第3回
A		31/60	28/54	34/34
B		15/60	5/54	0/34
C		14/60	21/54	0/34

0.1mm

写真 3 ロールのヒートストリーク起点の形態と発生率

発生したヒートストリークである。ヒートストリークを起点の形態で分類した場合、写真3(A)のスクラッチ状起点より発生しているものが最も多く50%以上を占めており、この原因を検討した。

ロール研削後で圧延する前の新ロールを観察した結果、ヒートストリークのスクラッチ状起点と同様なスクラッチが多数観察された。砥石の粒度が#46と#120で研削した場合のスクラッチ疵の一例を写真4に示す。粒度が#46の砥石で研削した場合のスクラッチ幅は150μ、深さは20μ程度であり、粒度が#120の場合、スクラッチ幅は50μ、深さは10μ程度でありほぼ砥石の粒度に相応するものであることがわかる。

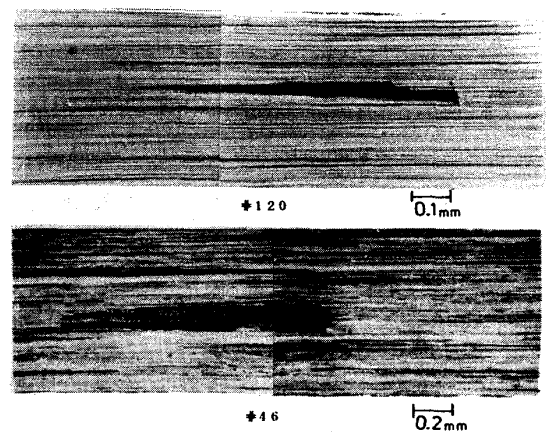


写真4. ロール表面の研削スクラッチ

これからヒートストリークのスクラッチ状起点はロール研削時に生じた研削スクラッチであると考えられる。

写真5には写真4に示した粒度#46の研削スクラッチから発生したロールのヒートストリークの光学顕微鏡写真とこのヒートストリークからレプリカを取り表面粗さを測定した結果を示した。起点部は凹、胴部は凸となっていることがわかる。

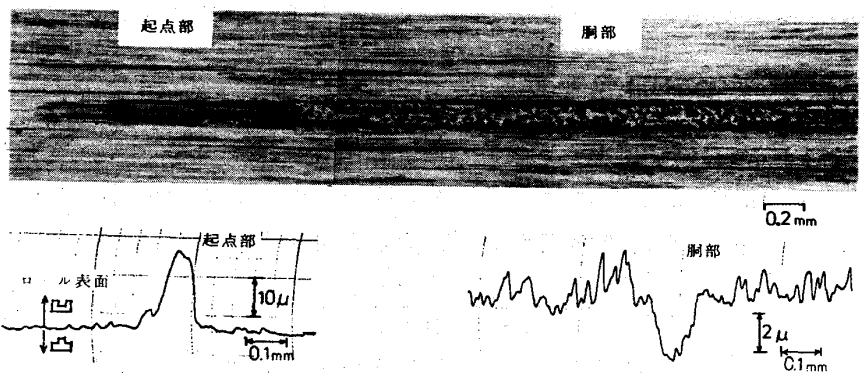


写真5. ロールのヒートストリークの光学顕微鏡写真とヒートストリーク部のレプリカの表面粗さ

このようにヒートストリークは圧下率、圧延速度の上昇等により研削スクラッチ部を起点として油膜破断を生じ、焼き付きに至ったものであると考えられる。

3・3 ヒートストリーク発生圧延条件の検討

圧延結果より各スタンドの出口におけるストリップ温度と油膜厚さを計算し、ヒートストリーク発生との関係を検討した。各スタンド出口におけるストリップ温度は圧延時の塑性変形仕事すべてストリップの温度上昇に作用するものとし(1)式で計算した。ストリップとロール間の熱伝導、摩擦発熱は無視した。

(塑性加工発熱による温度上昇; $\Delta\theta_d$)

$$\Delta\theta_d = K_f \cdot \epsilon / (J \cdot \rho \cdot C_s) \dots (1)$$

$$\epsilon = \ln(h_1/h_2), K_f = C(\bar{\epsilon} + \alpha)^n, \bar{\epsilon} = 2\epsilon_t/\sqrt{3}, \epsilon_t = \ln(1/(1-r_t))$$

$$r_t = (1-\beta)r_b + \beta r_f, r_b = (H_0 - h_1)/H_0, r_f = (H_0 - h_2)/H_0$$

K_f ; 二次元変形抵抗、 H_0 ; 母板板厚、 h_1, h_2 ; 各スタンドの入口、出口板厚

ρ ; 圧延材の密度、 C_s ; 圧延材の比熱、 J ; 熱の仕事当量、 β ; 0.6 (No 1std), 0.7 (No 2~4std)

本実験材の二次元変形抵抗 K_f は $K_f = 68.4 (\bar{\epsilon} + 0.032)^{0.26}$

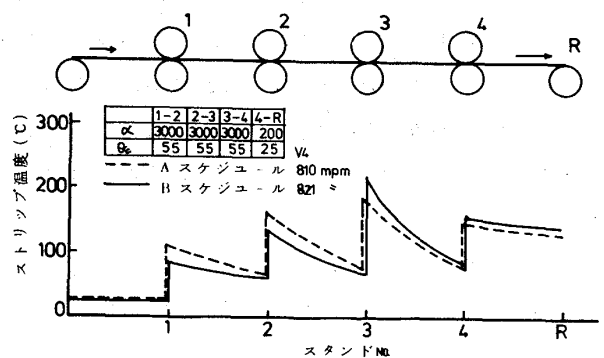


図3 タンデム圧延におけるストリップの温度変化

スタンド間の冷却は(2)式で表わされるニュートンの冷却法則に従うとして計算した。

$$\theta_x = \theta_c + (\theta_{EX} - \theta_c) \exp(-2\alpha t / (\rho C_s h_2)) \dots \dots \dots (2)$$

$$t = X/V_2, \theta_{EX} = \theta_{EN} + \Delta\theta_d$$

θ_{EN}, θ_{EX} ; ロールギャップ入口、出口温度

θ_c ; 冷却剤温度、 α ; 冷却剤とストリップ間の熱伝達率

h_2 ; 出口板厚、 V_2 ; 出口板速度、 ρ 、密度、 C_s ; 比熱

X ; ロールギャップ出口からの距離、 θ_x ; X点のストリップ温度

冷却剤とストリップ間の熱伝達率 α はコイル温度の計算値と実測値が一致する値とした。

Aスケジュールの圧延速度810 m/minでヒートストリークが発生していない場合とBスケジュールの圧延速度821 m/minでヒートストリークが発生した場合のストリップ温度の計算結果を図3に示した。No.3スタンドのストリップ温度が最も高く、ヒートストリークが発生したBスケジュールの方がAスケジュールよりも温度が高い。

ロールバイト出口における油膜厚さ $t_1(1-r)$ は(3)式で表わされる水野の式⁽⁴⁾より計算した。なおエマルジョンの物性値は不明であるのでNeat Oilの常圧粘度 η_0 、粘度圧力係数 r を用いた。

$$t_1 = \frac{3\eta_0 r (V_R + V_1)}{\alpha \{1 - \exp(-rP_1)\}} \dots \dots \dots (3)$$

η_0 ; 常圧粘度、 r ; 粘度圧力係数、 α ; 噛み込角度

P_1 ; ロールバイト入口における降伏応力、 r ; 圧下率

V_R ; ロール周速、 V_1 ; ストリップ入口板速度

以上の計算より求めた油膜厚さ、ストリップ温度とヒートストリーク発生との関係を図4に示した。ヒートストリークはストリップ温度の高い場合に発生しているが、油膜厚さとの関係はみられない。また摩擦係数とヒートストリーク発生との関係を図5に示した。ヒートストリーク発生と摩擦係数との関係はみられなく、巨視的な現象ではないことがわかる。ヒートストリークの発生にはロールバイト内の圧延油の流体的な挙動よりは、境界潤滑膜の耐温度特性が重要になると考えられる。

4. 結 言

実機4スタンドタンデムミルにおいて、ヒートストリーク発生機構の検討を行なった結果から次のような結論を得た。

- (1) ヒートストリーク発生の大きな原因は、ロール研削時に発生した研削スクラッチである。
- (2) ヒートストリークは圧延条件によりストリップ温度が高くなり、前記要因などから油膜破断を生じ、焼付に至る現象である。
- (3) ヒートストリーク発生と油膜厚さ、摩擦係数との明確な関係はみられなく、ヒートストリークは局部的な境界潤滑の影響が大きいと考えられる。

参考文献

(1) 佐藤ら; 潤滑 17-6(1972)、374 (3) 有村ら; 鉄と鋼 63-4(1977)、224
 (2) 佐藤ら; 塑性と加工 19-208(1978)、395 (4) 水野; 塑性と加工 7-66(1966)、383

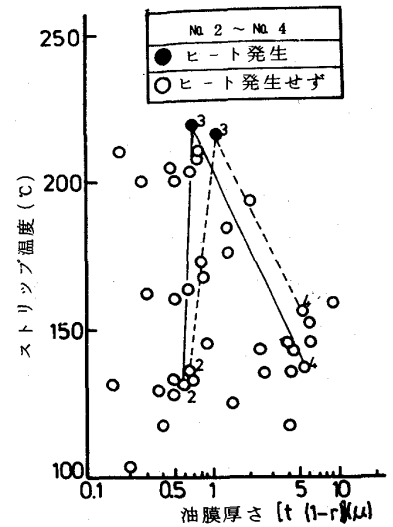


図4 油膜厚さ、ストリップ温度とヒート発生との関係

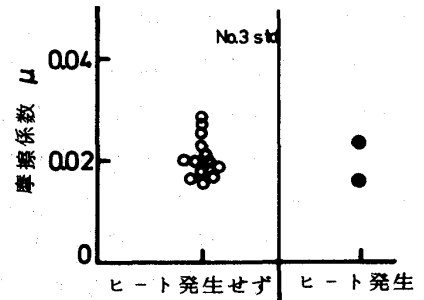


図5 摩擦係数とヒート発生との関係