

化現象を呈するグループに属する元素にあげることができたが、それぞれの富化状況の優劣は鋼種によつて異なるのみか、併発する脱炭状況と比較した場合にも桁違いに小さく、かつ量的にも相関しないことがわかった。

文 献

- 1) N. B. PILLING & R. E. BEDWORTH: J. Inst. Met. Lond., 29 (1923), p. 529
- 2) E. SCHEIL & K. KIWIT: Arch. Eisenhüttenw., 9 (1935/36), S. 405
- 3) E. SCHEIL: Z. Metallkde., 29 (1937), S. 209
- 4) 大竹, 石崎, 江口: 日本金属学会誌, 22 (1958), p. 640
- 5) W. SEITH (橋口隆吉訳): “金属における拡散” (丸善), (1939), p. 52

(110) 冷間圧延動作ロールの置き割れ現象について

(冷間圧延用動作ロールの研究—Ⅳ)

日本製鋼所

小谷 守彦・○阪部喜代三・松尾 治男

Some Delayed Failure Phenomena on the Cold Strip Mill Rolls.

(Study on the working rolls of cold strip mills—Ⅳ)

Morihiko ODANI, Kiyozō SAKABE and Haruo MATSUO.

1. 緒 言

冷間圧延用動作ロールには置き割れと称される一種の早期破壊現象が存在することが知られている。この置き割れは、ロール製造工場における最終の熱処理を完了してから、ある時間を経過した後に発生し、熱処理後のロールの機械加工の工程中や、圧延工場におけるロール使用の初期に発生することが多いが、破壊前のロールには何らの異常も検出することができない。この置き割れは、突発的に発生し、通常の場合、ロールは数片に分断、飛散するため、ロール以外の設備、人員に与える損害も大きく、もつとも危険な破壊現象と見なされている。

また、この破壊現象は、見掛け上、冬期に集中して発生するため気温の変動によつて付加される熱応力を含め、残留応力によるものと考えられていた。さらに、熱処理の際の焼割れと、熱処理後ある期間を経て発生する置き割れについての明確な分類も最近にいたるまで行なわれておらず、いずれも過大な残留応力に起因するものと考えられていた¹⁾²⁾。このため、筆者らは、前報³⁾に引き続きロールの残留応力の測定を行ない、残留応力の点から置き割れの発生傾向を検討したが、ロール間の残留応力の変動は小さく、破壊の主因をこれに求めることは困難であったので、過去の製造記録を再検討した結果、製鋼条件、特に水素含有量の相異によつて生ずる一種の遅れ破壊現象によるものと考えられる方が、むしろ妥当であるとの結論に達したので報告する。

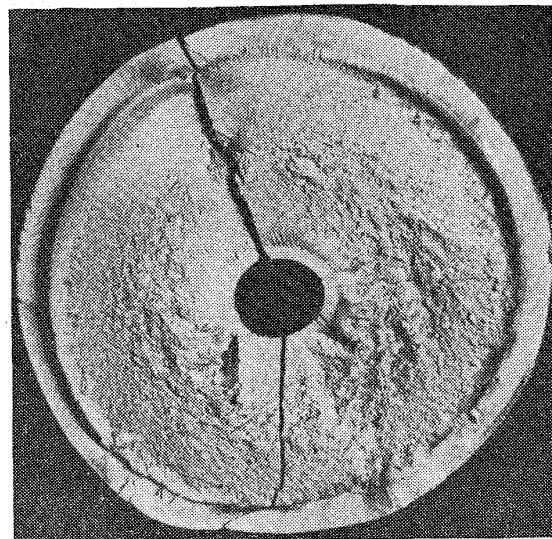


Photo. 1. Typical transverse fracture of the failed roll.

2. ロールの置き割れ破壊の状況

置き割れを発生したロールの胴部破断面の1例を、Photo. 1に示した。この破壊は、爆発的に生じ、通常ロールは数個に分断され、破片はかなりの広範囲に飛散する。また破壊前のロールには、各種の試験、検査によつても異常は検出されず、破壊に際しても破壊の徴候を探知することはできない。

破壊の起点は、Photo. 1からも明らかなように、ロール断面の残留応力からして、もつとも大きな引張応力が存在する部分にあるが、起点には少なくとも肉眼的に検出されるような非金属介在物その他の欠陥の存在は、1, 2の例外を除いて認められない。

3. ロール製造法と置き割れの発生状況

3.1 製造法

本報における試験および調査の対象としたロールは、すべて1%C, 1.8%Cr鋼の胴径405~460mmの鍛鋼焼入ロールで、完成時の表面硬度はショア硬度92~95の範囲にある。これらのロールは次の製造工程によつて作られたものである。

溶解(酸性平炉)—造塊—鍛造—焼鈍(球状化)—粗削—熱処理(水焼入, 低温焼戻)—研磨, 機械仕上—出荷。上記工程の間には、非破壊検査を含む諸検査が実施されるが、全工程の処要日数はおおよそ100日で、各工程とも一定の作業標準によつて処理される。特に造塊後の鍛造、熱処理などの熱履歴は、ロール間の変動について、ほとんど考える必要がない程度に規制されており、それぞれのロール間の特性には、ほとんど差異がないと判断される。

3.2 置き割れの発生状況

年間を通じての置き割れの発生状況をFig. 1に示したが、これより割れの発生は、7, 8月の夏期には皆無であり、しだいに割れ発生の頻度を増加し、冬期の11月に最大値を示した後、再び暫減の傾向をたどる。これより置き割れの発生の危険性は、あきらかに11~1月の冬期にもつとも高いといえる。

また熱処理終了時から割れ発生までの時間はFig. 2

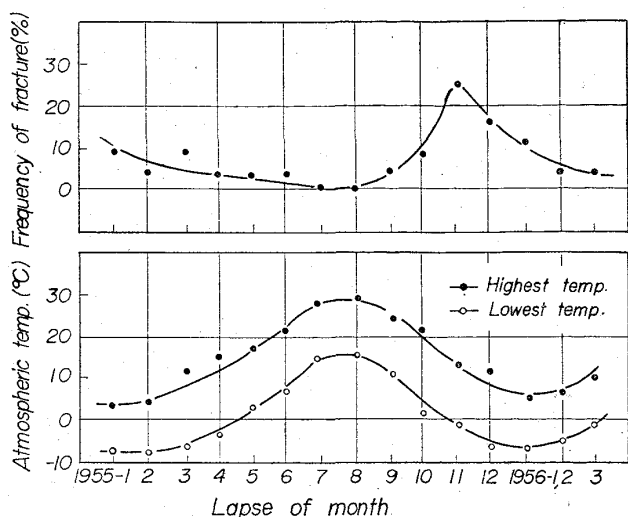


Fig. 1. Seasonal variation of frequency of fracture of the rolls and atmospheric temperature.

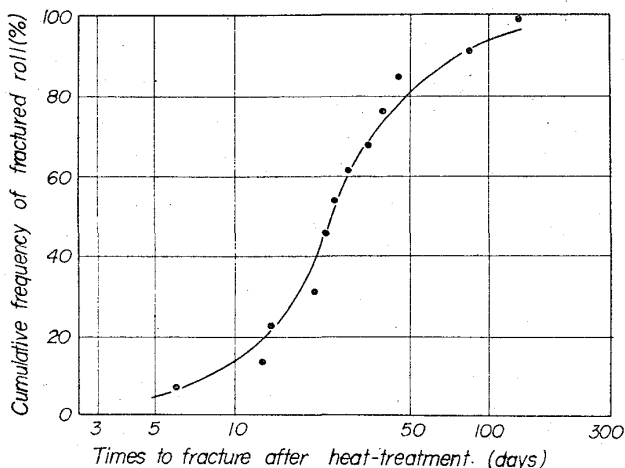


Fig. 2. Relation between frequency of the fractured rolls and times to fracture after the heat treatment.

の通りであつて、熱処理後 10~50 日の間に、置き割れを発生すべきもののおよそ 80% が破壊する。

4. 置き割れの発生因子についての検討

4.1 残留応力

前記の工程によるロールについて残留応力の分布を測定した結果は、既報³⁾のものと全く同様で、ロール表面および中心孔面に圧縮応力、ロール断面の肉厚の中心部

に引張応力が存在し、引張応力の最大点は肉厚の中心部より若干中心孔側に寄つた部分にあつて、Photo. 1 の破壊の発生起点と一致する。また引張応力の最大値は、軸方向応力で 100~120 kg/mm² の範囲にある。冷間圧延用作用ロールにおけるような熱処理による残留応力の分布形状および大きさを決定する因子を大別するならば、

- 1) 材料の大きさ、形状。
- 2) 材料の化学成分
- 3) 熱処理の際の加熱温度、冷却条件

と考えて差しつかえないであろう。本報の試験の対象ロールは、形状、材質、熱処理条件とも同一標準の中にあつて、偏差も小さいから、必然的に熱処理後の残留応力の変動も小さいものと考えられる。

置き割れの発生原因をロール間の残留応力の変動に求めるとするならば、Fig. 1 より冬期に置き割れの発生頻度が高いことが明らかな点から、ロールの熱処理実施の季節によつて残留応力が相異なるものと考えなければならぬ。季節的に変動させることのできる製造上の因子としては、焼入の際に使用する冷却水の水温であるが、四季を通じておよそ 10°~20°C であるから、季節によつて残留応力に特に大きな変動を与えることはないとみなされる。

また気温の変化による熱応力の残留応力に対する付加も、Fig. 1 の各月間の最高、最低温度の較差からして季節に大きな変動があるものとはみなされない。さらに、焼入後のマルテンサイトの崩壊、残留オーステナイトの分解によつて付加される応力も、低温焼戻後は安定し、無視し得る程度のものであることが知られているので、大きな影響を与えるものとは思われない。

残留応力に起因するといわれる焼割れは、焼入中に発生するもので、残留応力の発生ないしは安定の過程で生ずる破壊現象と仮定するならば、本報のロールの破壊のごとく、焼入後かなりの時間を経て、残留応力が完全に安定した状態で発生する置き割れは、焼割れと異なる現象であつて、残留応力のみで破壊の原因を求めることはできぬものと考えられる。

4.2 製鋼条件-特に水素含有量

置き割れの原因を残留応力に求めることが困難なため、ロールの製鋼条件、特に水素含有量の点から検討した。

水素量は、実際のロールの深部より採つた試料より測定しなければならぬが、実際の製品について、このようなことは不可能なため、出鋼直前の水素分析値によることとし、履歴の明確なもののみを整理すると Table 1

Table 1. Hydrogen contents at tapping. Numbers of fractured rolls and expected defectives of each heat.

Heat number	576	5109	5129	5131	5160	5177	5205	5236	632
H ₂ Content (PPM)	2.2	3.1	2.9	2.7	3.1	3.6	2.9	5.61	3.52
Total number of rolls	2	7	6	12	1	9	10	12	2
Normal	2	7	5	11	1	4	8	6	2
Defective	0	0	1	1	0	5	2	5	0
Fraction defective (%)	0	0	16.7	8.3	0	55.6	20.6	41.7	0
Expective value of normal	1.53	5.37	4.60	9.22	0.76	6.90	7.66	8.36	1.53
Expective value of defective	0.47	1.58	1.40	2.80	0.24	2.10	2.34	2.58	0.47

のごとくなる。なお鍛造、熱処理などによつて、水素含有量が減少することが知られているが⁵⁾、個々のロールの水素量は、同一熱履歴の場合、水素の減少率は等しいものと仮定するならば、このような整理は許されるものとする。Table 1 から厳密な統計計算を実施するには試料数が不足であるが、Fisher の直接確率計算の方法⁶⁾によつて、置き割れ発生数と溶解間の相関を検定すると、明らかに有意であつて、割れの発生および割れの生じないロールが得られる期待値から検討すると、9溶解の中、番号 5177, 5236 の2溶解が、他のものよりも置き割れの発生頻度が高いといえる。また、この2溶解の水素量が、他の溶解の水素量よりも高い点から、置き割れの現象は水素量の高いものに発生しやすく、出鋼直前の溶鋼の水素量が 3.5 ppm を超す溶解のロールは置き割れの危険性が高いといえる。

製鋼時の溶鋼の水素含有量は、大気湿度によつて左右されるため、季節によつて変動することが知られており⁷⁾⁸⁾、Fig. 3 のごとき傾向をたどる。一方ロールの置き割れ発生の傾向を、割れ発生の時季による Fig. 1 のような表示を採らず、溶解の時季によつて整理すると、6月～9月に溶解したものに割れの発生が集中することが認められ、置き割れは、水素含有量の高いロールに発生するものと判断してさしつかえない。

すなわちロールの置き割れは、水素による一種の遅れ破壊によるものといえる。遅れ破壊¹⁰⁾¹¹⁾は、水素を含有した材料に応力が負荷された場合、材料に特有の応力範囲で静的な疲労破壊が発生する現象で、亀裂発生潜伏期、亀裂の生長期を経て、破壊するものとされているが、ロールの場合応力が高いことと、Fig. 4 のごとき材料自体が脆性破壊の感受性の高い状態にあるため、亀裂の生長期が存在しないか、あるいは存在しても極く短時間で、ほとんど亀裂の潜伏期からただちに破壊するような形態をとるものと思われる。

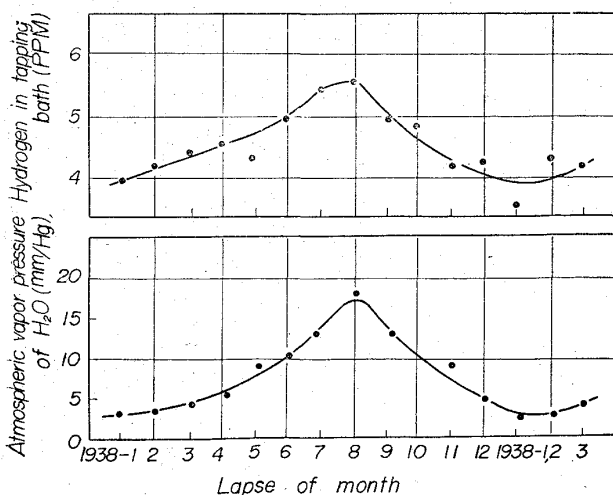


Fig. 3. Variations of the mean values of hydrogen in molten steel at tapping during a month and average partial pressure of water vapor in atmosphere during the same period. (S. KOBAYASHI⁷⁾)

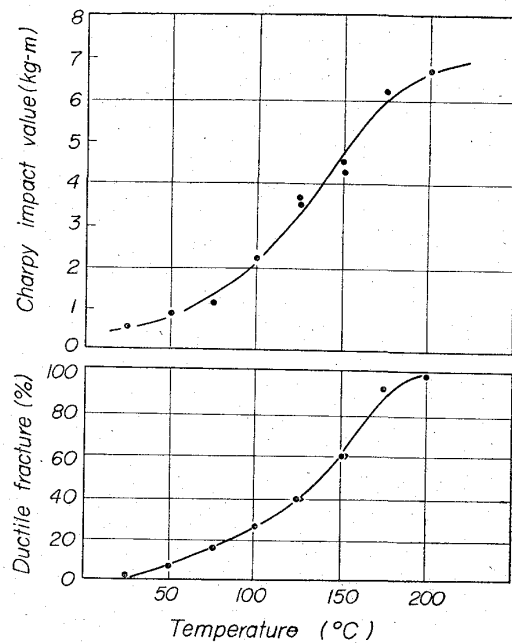


Fig. 4. Vee-notch charpy transition temperature curves on the material of mid-radius of the typical hardened roll.

なお同一溶鋼から製造したロールの中でも、置き割れを発生するものと、破壊しないものが生ずるのは、大型材料中の水素の分布は均一でなく、かなり大きく偏析していること¹²⁾、破壊の起点となるミクロ的な欠陥の存在の多様性から説明することができよう。

5. 結 言

冷間圧延用作用ロールの置き割れの現象について、残留応力および製鋼条件から検討を加え、置き割れは、焼割れと異なる現象であつて、負荷応力下の水素による一種の遅れ破壊であることを明らかにした。

また、試料数が少ないため、統計に基づく完全な結論は引き出せなかつたが、本報の対象工場における製造法による場合、夏期に溶解せるロールおよび出鋼直前の溶鋼の水素含有量が 3.5 ppm を超すロールは置き割れ発生の危険性の高いことを明らかにした。

文 献

- 1) 磯村, 佐藤: 日本金属学会誌, 25 (1961) 5, p. 360
- 2) 下田: 日本金属学会分科会報告第 V-A, (1952).
- 3) 下田, 阪部, 松尾: 鉄と鋼, 50 (1964) 12, p. 2063, p. 2066; 51 (1965) 5, p. 932
- 4) B. A. BRUSILOVSKIY & F. I. IVANOV: Fizika Metallov i Metallovedenie, 19 (1965) 1, p. 147
- 5) 小林: 鉄と鋼, 24 (1938) 3, p. 227
- 6) R. A. FISHER: Statistical Methods for Research Workers, (1924)
- 7) 小林: 日本学術振興会 製鋼19委員会報告 (昭和15年) p. 209
- 8) 松浦, 田口, 中村: 鉄と鋼, 41 (1955) 3, p. 334
- 9) 沢: 鉄と鋼, 41 (1955) 4, p. 417
- 10) A. E. SCHUETZ & W. D. ROBERTSON: Corros-

ion, 13 (1957) 7, p. 437

11) A. R. TROIANO: Trans. Amer. Soc. Metals, 52 (1960), p. 54

12) 阪部, 川口, 小野寺: 鉄と鋼, 40 (1954) 3, p. 111

(111) 芯部に非硬化部を有する円柱の熱処理による残留応力

(冷間圧延用作用ロールの研究-V)

日本製鋼所

工博 下田秀夫・○阪部喜代三・松尾治男

On the Residual Stresses of Cylindrical Steel Pieces with Unhardened Core.

(Study on the working rolls of cold strip mills-V)

Dr. Hideo SHIMODA, Kiyozō SAKABE and Haruo MATSUO.

1. 緒言

既報¹⁾のごとく、冷間圧延用作用ロールの残留応力が、ロールの諸特性に与える影響と、その重要性を明らかにしたが、各種の熱処理条件の相異による残留応力の一般的な挙動を知るために、実際のロールを用いて多数の実験を行なうことは、試験に要する時間、経費、あるいは焼割れ、置き割れなどの危険性の点から困難である。したがって実際のロールの模型として、直径 100mm, 0.4% C 鋼の円柱材を用い、熱処理条件、中心孔の有無による残留応力の分布状態の変化を試験したので報告する。

2. 供試材の調製と応力の測定方法

冷間圧延用作用ロールとして使用されるロールの大部分は、胴径 400~600mm 中心孔径 75~100mm 程度のものが多く、材質は 0.7~1.0% C, 1.0~2.5% Cr 鋼が用いられ、必要に応じて若干の Ni, Mo, V などの合金元素が添加せしめられる。また水焼入れ後の焼入硬化層の深さは、およそ 20~25mm 程度である。このようなロールの模型として、直径 100mm, 0.4% C の単純炭素鋼の円柱材を供試材として選択したが、この中点円柱の試験材を水焼入れた場合の焼入硬化層の深さはおよそ 7mm で、実際のロールとの直径の相異による焼入れ時の温度勾配、あるいは材質の相異による熱伝導度、熱膨張率、変態特性などが異なるとしても、ロールの熱処理の際の残留応力の挙動を窺うことはできるものと考えられる。

供試材は、Table 1 のごとき化学成分の、同一溶解のものを用い、熱間で直径 110mm の丸棒に鍛造後、機械加工によつて直径 100mm, 長さ約 400mm の形

Table 1. Chemical compositions of the test pieces. (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.40	0.26	0.21	0.016	0.016	0.11	0.08	0.04

状に仕上げた。熱処理は、加熱の際、表面層の脱炭防止のため、中性雰囲気電気炉を用いたが、加熱保持の温度は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ に制御した。また、水焼入れの際の水温は $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{C}$ とし、焼入れ中も温度上昇が認められぬ程度大型水槽を用いたが焼戻を実施した場合は、焼戻後炉中緩徐冷とした。

残留応力の測定に当たつては、それぞれの熱処理を行なった後、供試材の端面を約 50mm 切断し、約 300mm の長の試材としたものにつき、Sachs の内周削りの方法を用いて行なつたが、円柱の中心、あるいは内孔面、外周面の応力値は外挿によつて決定した。なお、内周切削の各段階においては、切削熱の発生防止に留意するほか、歪の測定を供試材、歪計とも恒温に保つて行なつた。

3. 焼入温度の影響

3.1 焼入温度が均一分布の場合

中実円柱につき、内外ともに均一に加熱し、焼入温度のみを $700^{\circ}, 750^{\circ}, 850^{\circ}, 900^{\circ}\text{C}$ に変化せしめ、各温度から水焼入れを実施したものの残留応力は、いずれも単純は熱応力型の分布を示し、外周面で圧縮、中心部で引張応力であるが、焼入温度が 700°C より 800°C に上昇するにしたがい残留応力の最高値も上昇する。なお焼入

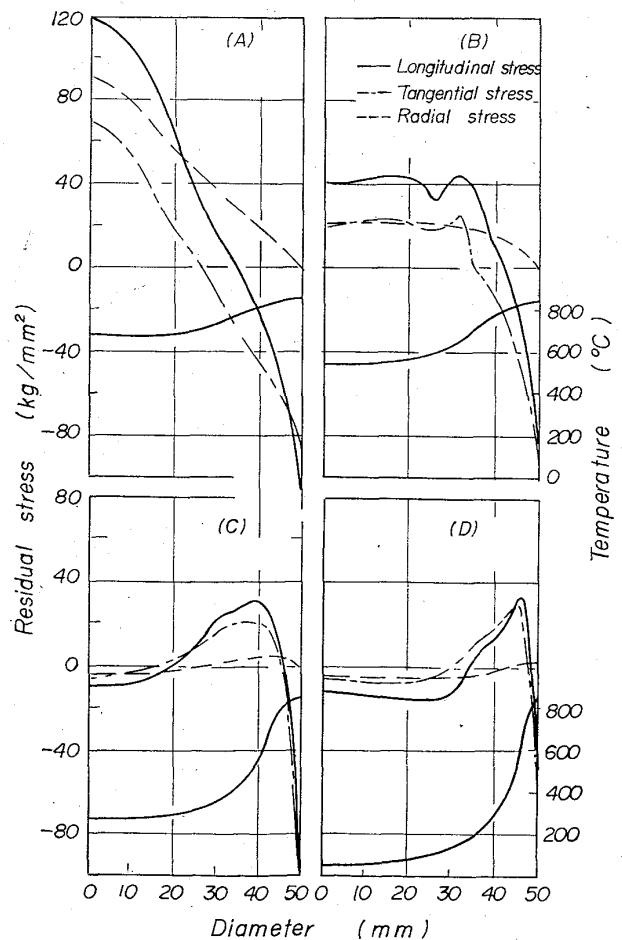


Fig. 1. Residual stresses on the test pieces which shows temperature gradient between inside and outside at quenching.