冷間圧延用補強ロールスリーブにおける 転動疲労被害のX線の観察*

下 田 秀 夫** 荒 木 田 豊** 柴 崎 鶴 雄***

X-Ray Investigations on the Rolling Contact Fatigue Damage of the Back Up Roll Sleeve Served for Cold Strip Mill

by

Hideo SHIMODA, Yutaka ARAKIDA and Turuo SHIBAZAKI
(The Japan Steel Works, Ltd., Muroran)

In order to detect the rolling contact fatigue damage, the changes of the diffraction line width within the surface layer of the roll sleeve served for cold strip mill has been investigated by X-ray back reflection method. The results are as follows;

(1) The fiber texture exists within the surface layer of about 60μ thickness. And, some ups and downs appear in the distribution curve of values of diffraction line width within the range of about 4 mm depth from the surface.

(2) On the occasion of giving a dressing on sleeve surface, if the thickness which is removed by each dressing was smaller than the thickness of range which is occupied by rolling contact fatigue damage, the becoming shallow of the depth of maximum damage follows in consequence of the accumulation of damage.

(3) The shape of the distribution curve of values of diffraction line width is phenomenologically understood as the results of the composition of each contribution due to fiber texture, accumulated fatigue damage and original crystal structure of this material.

(4) The X-ray back reflection method applied to the surface during the successive etching may be utilized as semi-non-destructive detection of the rolling contact fatigue damage within the surface layer of roll sleeve.

(Received Aug. 6, 1962)

1. 緒 言

圧延用補強ロールまたはそのスリーブの表面では、圧延機の稼動中に圧縮力が繰り返して加えられるために転動疲労が起き、これがピッチングあるいはスポーリングと呼ばれる破壊損傷の原因になると考えられている。したがって、ロールを使用する際には、この種の破壊損傷が起きる以前に、疲労が起きている表面層をドレッシングなどによって除去してしまうことが望ましい。このような措置を適正に行なうためには、まず転動疲労が起きる深さとその進行の模様を確実に知っておく必要がある。

作動ロールとの接触によって生ずる補強ロール表面層の応力分布については、それを計算によって解析することができ、転動疲労の起きやすい深さも求められ¹⁾。しかし、ロールの回転に伴って起きる、ロール表

面層における応力の繰返しは単純ではなく、かりに応力振幅が最大になる深さを計算によって求めたととしても、実際にはその値に近いある範囲のどこかで疲労が始まると考えるべきである。

この報告では、このような疲労が実際に起きる深さを早期に認知することが、ロールの圧延成績を向上させる目的から重要な問題であることにかんがみて、実体の冷間圧延用補強ロールのスリーブ表面層を主としてX線的に観察した結果について述べる。

2. 供試材料および観察方法

(I) 供試材料

観察は、実体の冷間圧延用補強ロールスリーブの表面層から切り出した試験片について行なった。この材料の化学成分および熱処理条件を Table 1 に、またこのロールスリーブの完成形状およびその寸法を Fig. 1 にそれぞれ示した。

このロールスリーブは、可逆式冷間4段圧延機の補強ロールに焼ばめされて実用に供されたもので、圧延

* 原稿受付 昭和37年8月6日、当協会第1回X線応力測定シンポジウムにて講演(昭37.7)

** 正員 株式会社日本製鋼所室蘭製作所

*** 株式会社日本製鋼所室蘭製作所

トン数が約 13 000 トンに達したころ、疲労による縦割れが発生し以後使用不能となったものである。実用中に行なわれた数回にわたるドレッシングによって、供試時におけるその直径および肉厚は、それぞれ Fig. 1 の括弧内に示す値に減少していた。なお、これと組合せの作動ロールの直径は 413 mm であった。

試験片の形状および寸法は Fig. 2 に示すとおりである。このような試験片を縦割れの起点から約 10 mm 離れた部分から表面をきずつけないようにして切り出し、観察のために供試した。

(II) 観察方法

X線による観察は次のようにして行なった。最初はロールスリーブの表面がそのまま試験片の表面になっているので、まず、この面について背面反射写真を撮影した。次に、10%硝酸アルコール溶液、もしくは50%硝酸水溶液によって、この表面を脱脂綿でこすりながらある厚さだけ腐食除去したのち、同じ条件で再び背面反射写真を撮影した。このような操作を反覆することによって(これを逐次腐食法と呼んでおく)、表面層におけるいろいろな深さの部分の試験片の表面に次々とさらすことができる。このような方法は、同一試験片については観察をやりなおすことができない欠

Fig. 1 Shape and dimensions of tested roll sleeve

Fig. 2 Shape and dimensions of specimen

点はあるにしても、ごく薄い層を逐次、詳細に観察するためには最も確実な方法であろう。腐食によって除去された厚さは、てんびんによる重量測定の結果から算出した。また、表面から 10 mm 以上の深さの部分についての観察は、これを逐次腐食法だけで行なうことは時間的に不利であるので、別な試験片を試験材の適当な深さから切り出し、切り出した面を 50%硝酸水溶液で強腐食して、切断による加工変質層を完全に除去したものについて観察を行なった。

X線は、Fe 特性線をフィルターなしで用い、直径 120 mm のフィルムカセットを有する背面反射カメラによって、 $(220)K\alpha_1$ 、 $(220)K\alpha_2$ および $(310)K\beta$ の各回折環を撮影した。試験片表面における X 線照射視野の大きさは、直径 1 mm とし、フィルム面と試験片表面との距離は 50 mm とした。

このほか、顕微鏡組織の観察およびかたさの測定を同時に行なった。

3. 観察結果

(I) X 線回折像

試験片表面における $(220)K\alpha$ 回折環は Photo. 1(a) に示したように、かなり散大しており、しかもその黒化が回折環の全円周にわたって一様に行なわれていないことが注目される。黒化の稠密な部分が生ずる方向と、試験片表面における圧延方向との関係は Fig. 3 に示したように互に直交している。これはロールスリーブ表面層が繊維組織をとっていることを示すものである。すなわち、圧延中に加えられる荷重によって、ロールスリーブ表面にはある程度の塑性変形が生じていることを知ることができる。この繊維組織における結晶の選択配列の方向については、この観察結果だけでは明確なことはいえないにしても、圧延方向に直角な方向に対する $(220)K\alpha$ の反射強度が大きいことか

Fig. 3 Fiber pattern at specimen surface

Table 1 Chemical composition and heat treatment of material

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
Chemical composition (%)	0.74	0.26	0.56	0.025	0.031	0.11	1.04	0.27	0.09
Heat treatment	900°C/10h A.C.→750°C/20h F.C.→850°C/5h O.Q.→480°C/12h A.C.								

ら考えて、(110)方向が圧延方向にむき、かつ(112)面が圧延面に平行になるような配列に近いのではないかと推察される。このような繊維像は、深さが約 10μ のところではいったん消失し、さらに約 30μ の深さになると、Photo. 1(b)に示すように、その程度は僅少であるが、上述のそれと直交する方向に現われる。表面からの深さが約 60μ になると、繊維像は完全に消失してPhoto. 1(c)に示すように、 $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ とによる比較的鮮鋭なダブルレットが得られる。(310) $K\beta$ については、その相対強度が小さいため、繊維像については明

確なことはわからなかった。

逐次腐食がさらに進むと、回折環が再び散大しはじめ、ある深さでその程度がPhoto. 1(d)に示すように最大に達したのち、漸次鮮鋭さを取りもどしPhoto. 1(e)に示すようにダブルレットとして識別できる程度になってから、またび散大しはじめてPhoto. 1(f)に示すようなパターンに落ち着く。これらの変化を定量的に表わすために、各回折写真をフォートメトリーしてその黒化度曲線を求め、それぞれの半価幅の値を測定した。この結果をFig. 4(a)および(b)に示した。Fig. 4(a)は、表面に近い部分(表面から約4mmの深さまでの部分)における、またFig. 4(b)はロールスリーブ肉厚全体における半価幅の値の分布を示している。Fig. 4(b)において、ロールスリーブの内周に近い部分に現われる半価幅の減少は、この材料を

Photo. 1 X-ray diffraction patterns at various depth from the roll sleeve surface

Fe, (200) $K\alpha$, (310) $K\beta$

Fig. 4 (a) Distribution of values of the diffracted line width within the surface layer of roll sleeve

Fig. 4 (b) Distribution of values of the diffracted line width of roll sleeve

Photo. 2 Microscopic structure within the surface layer of roll sleeve ($\times 200$)

熱処理したときに質量効果のために、この部分に一部パーライト組織ができたことによるものであって、このことは顕微鏡組織およびかたさの変化から確かめられる。

(II) 顕微鏡組織

表面(圧延面)に垂直な断面について低倍率で観察すると、表面から約60 μ の範囲が層状になっており、これをすぎると、強く腐食されて黒ずんだ部分が現われていることがわかる。この部分は、表面から約1mmの深さに及んでおり、それから深部ではロールスリーブ内周付近を除いて、とくに目だった差異が認められなかった。高倍率で観察すると、少なくとも深さ50mmまでの組織には大きな差異がなく、焼もどしベイナイト組織を呈していることがわかる。Photo. 2には、そのうち表面に近い3部分の組織を示した。

(III) かたさ

表面に垂直な全断面について行なったかたさ試験の結果を Fig. 5 に示した。表面から約15mmまでの範囲では大きな変化を示していないことがわかる。なお内部におけるかたさ分布の山と、それに続く傾斜は、すでに述べたように熱処理にあたってロールスリーブの内周近くで一部パーライト変態が起きたことによるものであって、このことは顕微鏡組織からも確かめられる。さらに、表面に近い部分におけるかたさを、小さな測定荷重で求めてみたが、表面から7mmの深さまでの間でとくに明確に認められるほどの変化を示さなかった。

4. 考 察

(I) ロールスリーブ表面層における応力解析および疲労被害の蓄積

稼動中のロールスリーブ表面層における応力分布は表面に摩擦力が働かないものと仮定すれば、Hertz によって解析された方法にしたがって求められる¹⁾。いま、疲労が圧延面に平行な面に働くせん断応力 τ_{xy} によって支配されるものとして、ロールスリーブの稼動中に

Fig. 5 Distribution of hardness number of roll sleeve

生ずる疲労被害の蓄積を考へてみることにする。

τ_{xy} の分布は Fig. 6 に示すような形になるが、この分布においてもこの材料の両振りねじり疲労強度 τ_w よりも大きい部分があれば、稼動中にこのロールスリーブはその部分に疲労被害を生ずる。Fig. 6 における区間 AB がこのような範囲であるとする、ロールスリーブが n 回転したのちには、この範囲のいろいろな応力振幅に対応する疲労寿命 $N(\tau)$ で決まる $n/N(\tau)$ なる疲労被害が生ずるはずである。もし、この材料の転動疲労寿命が、回転曲げ疲労寿命などにおけると同様に、

$$N = e^{-a\tau + b}, (\tau > \tau_w)$$

なる形で表わされるものとすれば、疲労被害については、

$$n/N = n/e^{-a\tau + b}, (\tau > \tau_w)$$

となり、 τ が表面からの深さ d の関数として求められれば、疲労被害も表面からの深さの関数として表わすことができる。

Fig. 6 に示した τ と d との関係は、 d/l が 0 から 1.5 までの層については、この試験条件では

$$\tau = 41 \cdot 6 d^{1/2} e^{-d/8.48}$$

によって近似できる。Fig. 6 に示した疲労被害の分布は、これを基本にして $a = 0.383$, $b = 24.2$, $n = 10^4$ として求めたものである。

このような疲労被害が生じた状態で圧延を休止してドレッシングに移るものとすれば、ドレッシングの量が疲労被害が生じている深さと大差ない値であるときには、ドレッシングによって疲労被害がその一部だけしか除去されないから、次の圧延が開始されて、新たに生ずる疲労被害が残留する疲労被害に加算されることになる。このような疲労被害の蓄積の模様は、上述の諸式によって解析的に知られるはずであるが、関数形が複雑であるので、ここではその傾向を定性的に知るために、図式的に表わしてみることにする。

Fig. 7 は、ドレッシングの量が疲労被害の最大点の深さの半分である場合の疲労被害の蓄積をドレッシングの回数が 5 回に至るまでの間にわたって示したもの

Fig. 6 Distributions of stress amplitude τ_{xy} and damage n/N

である。この結果において注目されるのは、疲労被害の分布における最大値が逐次大きくなることは当然であるとしても、その最大点の深さがしだいに表面に寄ること（ある回数で最大点が2箇所を生ずようになるが、いずれの点の深さも最初のそれよりも小さい）、およびその最大値が一定の値に漸近する傾向を示すことである。このような傾向は、1回の稼動によって生ずる疲労被害の分布、いかえればロールスリーブの稼動条件および1回のドレッシングの量によって、多少の差異はあるだろうが、ドレッシングによって疲労被害の生じた部分をいちいち確実に除去するようにしないかぎり、必ず起きる現象である。したがって、不合理なドレッシングを行なえば、蓄積された疲労被害の分布における最大値が一定の値に漸近する前に寿命（マイナーの法則により、これは1に近い値であると考えられる）に達し、スポーリングが発生するおそれがある。このような意味において、1回の稼動によって生ずる疲労被害の分布を知ることは、きわめて重要な問題であると考えられる。

(II) 観察結果の解釈

Fig. 4 に示した結果によれば、X線回折環の半価幅の値は、表面、表面からの深さが約0.6 mmの付近および表面からの深さが4 mm 以上における広い範囲の3部分で大きな値をとっている。表面においては、さきに述べたように繊維組織を示しているので、第1の部分はこれを冷間加工の影響層であると考えてよい。このことは、ロールの接触と転動によって、弾性限以上の応力が表面層に生じたことを示すものである。こ

Fig. 7 Process of accumulation of fatigue damage

種の応力の発生源としては、表面におけるすべりが考えられる。

次に、第3の部分は、半価幅の値の分布が材料の充分内部まで急変していないことから考えて、これをこの材料固有の分布とみることができよう。したがって、この観察結果における半価幅分布の解釈において問題になるのは、深さ約0.6 mmの点を中心とする山と、それに続く深さ約3 mmまでの谷の部分である。

前者は、ピクリン酸アルコール溶液による腐食を行なうと、他の部分に比べて黒ずんで見えた領域に相当するが、顕微鏡組織およびかたさについては、この領域にとくに大きな変化が認められなかったことから、この半価幅分布の起伏が、組織変化のために生じたものであるとはいえない。

この材料のねじり疲労強度 τ_w は27 kg/mm²（回転曲げ疲労試験の結果から推定した値）であり、一方ヘルツの式から算出される $(\tau_{xy})_{max}$ の値は34 kg/mm²であって、このロールスリーブ表面層に転動疲労が起きる可能性は充分考えられる。疲労の進行に伴ってX線回折環が示す変化は材料の初期の状態や、応力の繰返速度によっても差があるといわれているが、焼なまし材については、疲労強度よりも高い応力が、ある限界の値以下の繰返速度で加えられるときには、回折環の幅は増大⁴⁾⁶⁾すると考えられている。また、最近の研究においては、疲労強度よりも低い応力が加えられる場合にも、回折環の幅がある程度まで増大することが明らかにされている。一方、焼入れ材については、繰り返し荷重を加えていく初期の段階では、これらの材料には最初から微視的な内部応力や格子欠陥が多く内在しているために、それがまず弛緩または均斉化されることに対応して、上述と逆に回折環の幅がいったん減少⁷⁾することが報告されている。この材料については、それが焼入れ後500°Cに焼もどされていることに徴して、上述の焼なまし材および焼入れ材がそれぞれ示す変化の中間的な形をとってもよいと考えられ、したがって観察結果は次のような過程によって説明されるものと

Fig. 8 Schematic representation of factors contributed to distribution of values of diffracted line width

考えられる。

すなわち、この材料は焼入れしたのち比較的低温度で焼もどされているので、荷重の繰返しに伴ってまず回折環の幅が減少する。次に、荷重の繰返しがある値に達すると、 $(\tau_{xy})_{max}$ に相当する深さの部分に、局所的な塑性変形が生じはじめ、その結果新たな結晶の微細化および粒界などにおける微視的内部応力の増大が起こり、これが回折環の幅を増加させる。この結果、観測される回折環の半価幅の深さ方向の分布は Fig. 8 における鎖線のような形になるものと考えられる。なお、図中の破線は、このロールスリーブにおける稼動前の半価幅分布を示している。半価幅分布における極大点の深さは、ドレッシングを考えなければ $(\tau_{xy})_{max}$ の深さにほぼ等しくなければならず、この材料については圧延条件を考慮すれば、それが 1.7 mm となるが、実際には、稼動中に逐次ドレッシングされるので、さきに述べたように疲労被害の蓄積が起き、この深さがより小さくなり、観測結果に見られるように表面から約 0.6 mm の部分を中心の一つの山が生ずるものと考えられる。さらに、ロールスリーブ表面では、接触と転動とによる局所的な塑性変形層が生ずるから、結果として Fig. 8 における実線のような起伏にならないわけであり、観測結果も一応理解されるであろう。

(III) ロールスリーブの転動疲労被害の検出

この観察において用いた逐次腐食法は、実体の材料についても適用でき、しかもその材料を、そのために使用不能にすることがないから、いわば準非破壊的な方法と考えてよい。しかし、この方法が比較的手間のかかることから考えて、実体のロールスリーブの一つ一つについて随時行なうというわけにはいかないであろう。したがって、新しいロールスリーブの最初のドレッシングの直前とか、もしある段階で大量のドレッシングを行なうことがあるとすれば、その次のドレッシングの直前に適用するのが実際的ではないかと考える。

5. 結 言

実体の冷間圧延用補強ロールスリーブの表面層を主として X 線的に観察した結果は次のように要約される。

(1) ロールスリーブ表面には、約 60μ の深さにわたって繊維組織が存在している。また、ロールスリーブ表面層における X 線回折環の幅の分布には、いくつかの起伏が観測された。

(2) 転動疲労被害は、ロールスリーブが稼動中にドレッシングされる場合には、ドレッシングの量が疲労被害が存在する深さより常に小さいときには、逐次蓄積し、その結果疲労被害が最大となる深さがしだいに浅くなる傾向を示す。

(3) 観測結果における X 線回折環の幅の分布は、繊維組織、蓄積された疲労被害および材料固有の半価幅の合成として考えれば、現象論的に理解される。

(4) 逐次腐食法によって X 線観察を行なうことはロールスリーブの疲労被害の準非破壊的検出法として利用できる。

なお、引き続きモデルロールによる基礎試験、繰返し荷重下における X 線回折環の変化および他の実体ロールスリーブについての観察等を行なう予定であるが、これらの結果については、稿を改めて報告する所存である。

参 考 文 献

- 1) 小野鑑正, 材料力学, 593 (1948)
- 2) 石橋正, 金属の疲労と破壊の防止, 301 (1954)
- 3) E.L. Radzimovsky, Stress Distribution and Strength Condition of Two Rolling Cylinders Pressed Together, University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series, No. 408 (1953)
- 4) H.J. Gough and W.A. Wood, A New Attack upon the Problem of Fatigue of Metals, Using X-Ray Methods of Precision, Proc. Roy. Soc., 154, 510 (1936)
- 5) H.J. Gough and W.A. Wood, The Crystalline Structure of Steel at Fracture, Proc. Roy. Soc., 165, 358 (1938)
- 6) 平, 本田, X 線による金属材料疲れ破壊に関する研究, 日本機械学会論文集, 26, 926 (1960)
- 7) 平, 本田, X 線による熱処理炭素鋼の疲労の研究, 日本金属学会誌, 24, 331 (1960)