

Photo. 1. Wear pattern on roll surface.

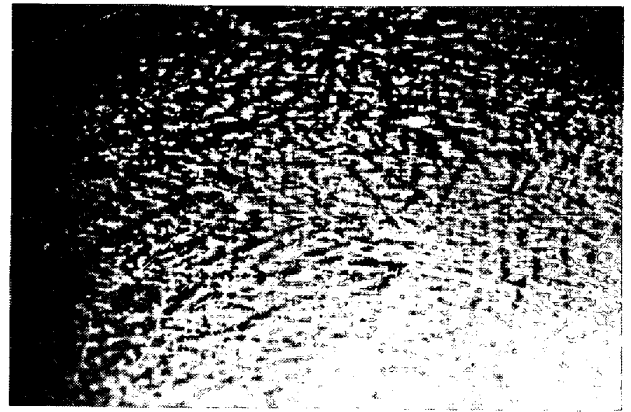
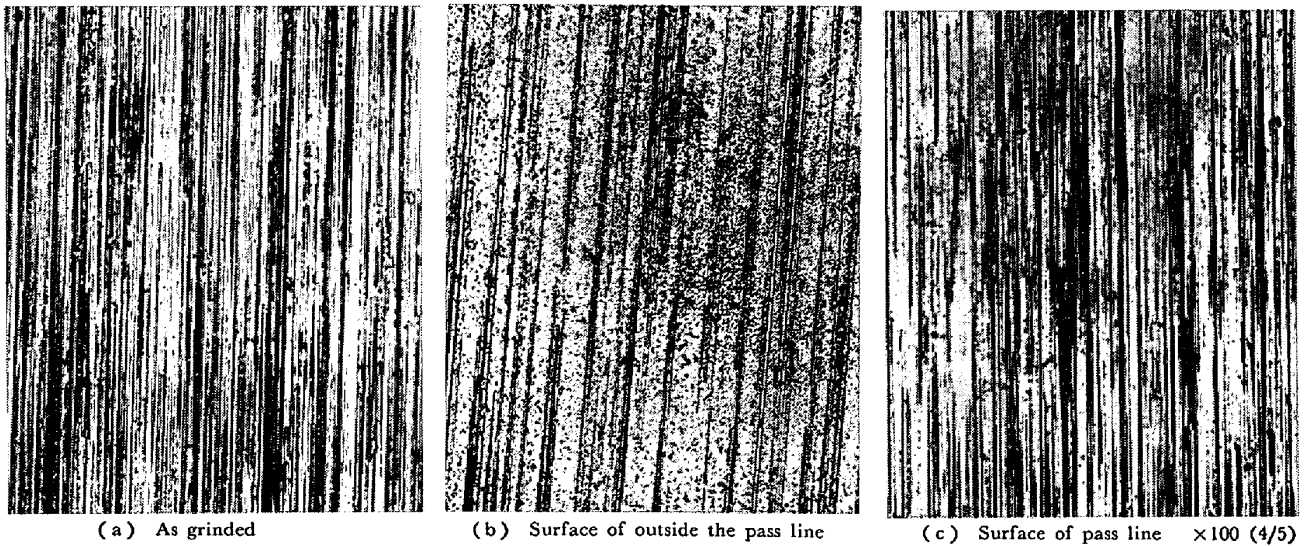


Photo. 2. Macrostructure on roll surface.
(same region as the Photo. 1.)

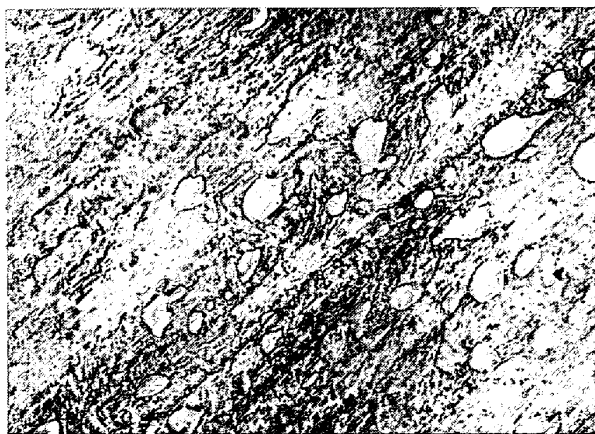


(a) As grinded

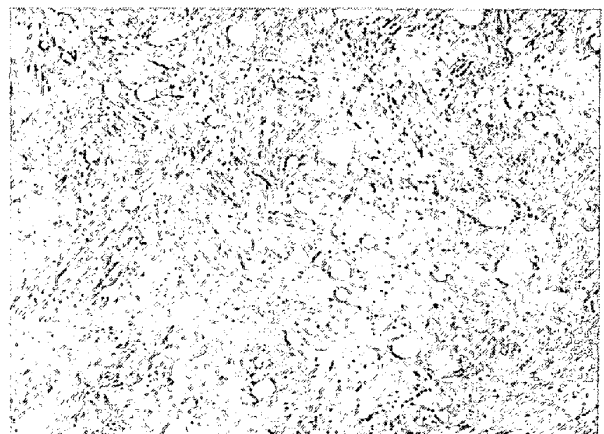
(b) Surface of outside the pass line

(c) Surface of pass line ×100 (4/5)

Photo. 3. Micro-observation on roll surfaces.



(a) As-rolled



(b) After polishing ×5 000

Photo. 4. Electron-microphotographs on roll surface. ×5 000

次に Photo. 3 (c) の部分を三塩化錯酸で軽腐食し、電顕用レプリカを採取し、高倍率観察をおこなった結果が Photo. 4 (a) である。さらに同一箇所を #320 エメリー紙で研磨後ハフ仕上までおこなって同様の腐食をし

観察した結果が Photo. 4 (b) である。この両組織の比較から表面における焼もどしの進行などの冶金的な組織変化は明らかでないが、流動変質が生じていることが認められ、またその流動の状況は炭化物の存在によつてか

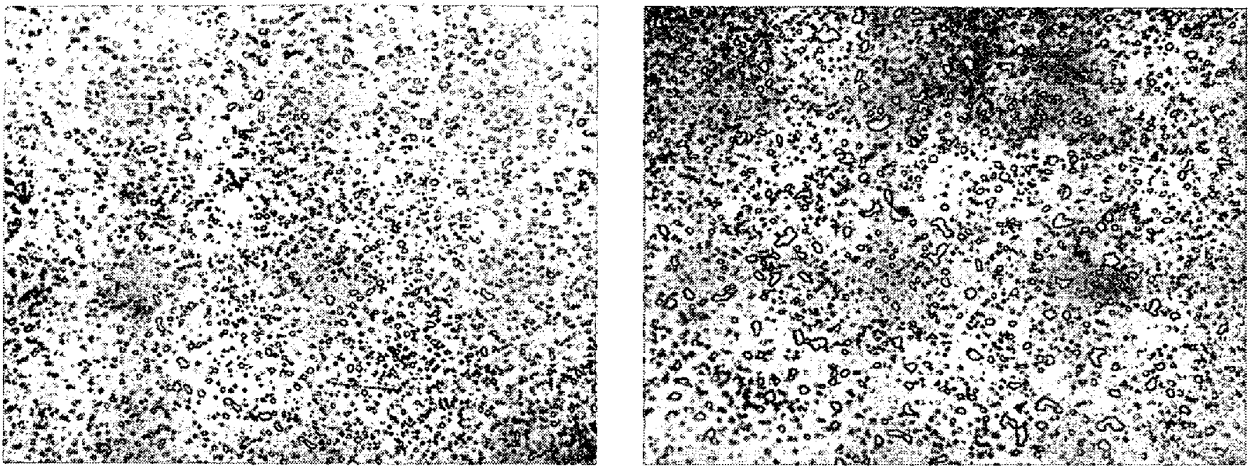


Photo. 5. Variation of carbide distribution in dendrite arm and interdendritic region.

なり影響されることを示唆している。

この変質層の深さは、#320 エメリー紙で研磨したテストピース（かたさ HRC 62）の厚さ減少の測定値から推定すれば、5~8 μ 程度にすぎない。

以上の観察結果により、肌荒れ部分ではひつき疵が生じていることおよび流動変質層が存在することが明らかになったが、肌荒れ模様との関連性は明りようでない。

したがってロール表面を0.1 mm 程度研磨して、圧延の影響を除去した後、デンドライトのアーム部と樹間部とのマイクロ組織を比較した。その結果、Photo. 5 に示すようにアーム部では炭化物が比較的均一に分布しているが、樹間部では巨大炭化物の存在する箇所が認められ、両者の炭化物分布にかなりの相違があることが明らかになった。

2.3 合金元素の偏析

上記の炭化物分布の不均一性は、Cr および Mo などの合金元素の偏析に起因すると考えられるので、ロール表面より試験片を採取し、ARL-島津製 EMX 型 X 線マイクロアナライザー（以下 EPMA と略す）を使用し

Table 1. Scanning condition with EPMA.

Accel. voltage	30kV
Sample current	0.2 μ A
X-ray spot size	5 \times 45 μ
Sample trans. rate	96 μ / min
Chart speed	20 mm / min

て、Cr および Mo について線分析をおこなった。分析条件は Table 1 に示すとおりで、走査距離は約3.6 mm である。

その結果、Fig. 1 に示すように含有量の多い Cr の場合とくに顕著な偏析傾向が認められた。この分析結果から Cr の最高濃度と最低濃度の比（以下この比を偏析指数 I_s とする）をとれば、約 1.4 となる。

2.4 かたさ分布

ロール表面のかたさは Hv 800 あるいはそれ以上であるが、上記の合金元素の偏析のために位置によつてかたさが相違することが推定される。

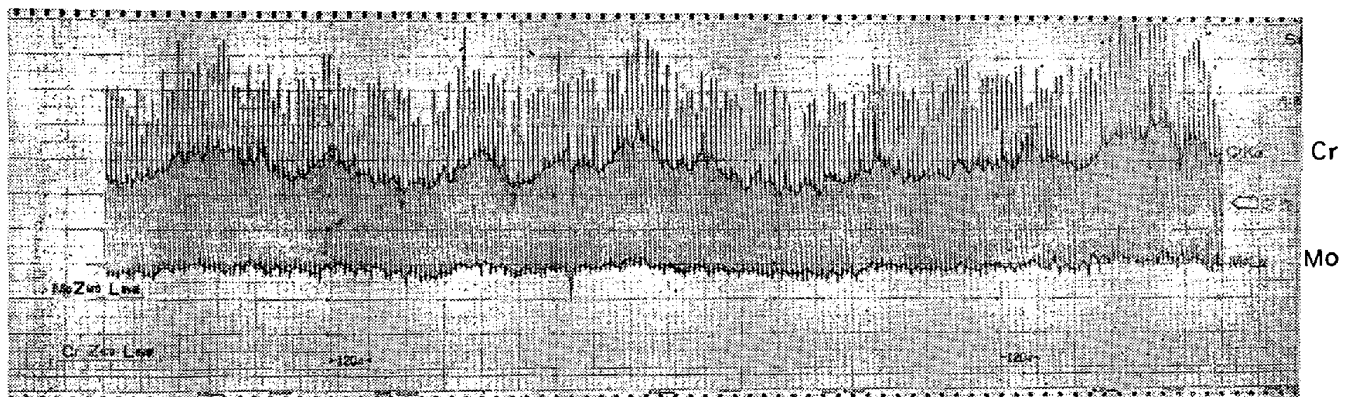


Fig. 1. Electron probe traverse across dendrite arm on roll surface.

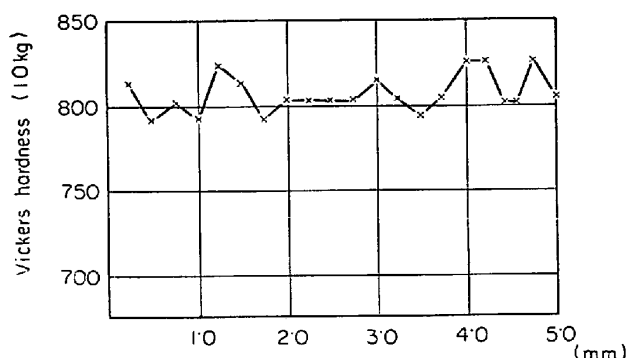


Fig. 2. Hardness distribution on roll surface.

Fig. 2 の結果は、EPMA で線分析をおこなった試験片でかたさ分布を測定した結果であり、測定はピッカース硬度計 (荷重 10 kg) を使用し、ロール周方向に 0.25 mm 間隔で約 5 mm の範囲についておこなった。

デンドライトアーム間隔に比較すると、かたさの測定間隔が大きいため、小さな変動は検出されないが、1~3 mm の間隔で Hv 30 程度のばらつきが存在する。このかたさ変動の間隔は、Photo. 1 の肌荒れの山と谷の間隔にほぼ一致しており、部分的かたさの差が肌荒れの発生に影響していることを示唆している。

3. 残留マイクロ偏析に及ぼす鍛錬の影響

上記のロール表面状況の調査結果から、肌荒れの主原因は合金元素の残留マイクロ偏析によるものであらうと考えられる。したがって冷延ワークロール材の残留マイクロ偏析に及ぼす鍛伸比および加熱拡散の影響を調査した。

3.1 実験方法

供試材は 100 kVA 高周波炉で溶製し、200 mm φ × 500 mm L の砂型鋼塊に鑄込んだ。化学成分は Table 2 に示すような冷延用ワークロール材である。

デンドライトの大きさは、凝固速度に影響される²⁾ので鋼塊の径によつて大きく変化し、また同一鋼塊でも位置によつてかなり相違する³⁾。

本実験の供試材は、砂型鋼塊であるので凝固速度の比較では 380~400 mm φ の金型鋼塊に相当する⁴⁾が、なお実際のロール用鋼塊の径に比較すれば、1/2~1/3 にすぎない。

したがって鋼塊のデンドライトアーム間隔も、実際よりかなり小さいと考えられるが、これを Fig. 3 の形状

Table 2. Chemical composition of material.

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0.81	0.31	0.32	1.83	0.33	0.11

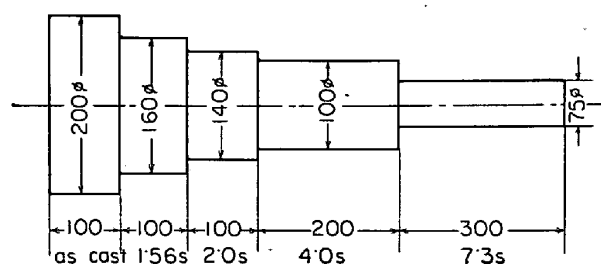
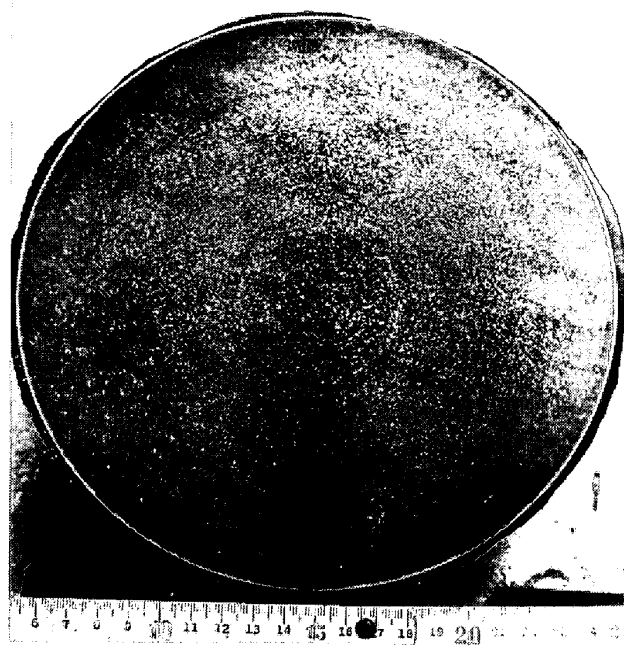


Fig. 3. Dimensions of specimen.



(a) As-cast



(b) Forging ratio: 4.0S

Photo. 6. Macrostructure of cross section of specimens.

に段付き鍛造することによつて、数種のデンドライトアーム間隔の試料を作製し、成分拡散の影響について実験した。

鍛伸は1200°Cに加熱後、2tエアハンマーでおこなつたが、5回の繰返し加熱を必要とした。1回の加熱時間は約30minであるから、合計2.5hr加熱されたことになり、この間の成分拡散も無視することはできないが、as castの試料も同時に加熱することにより、各試料ともその影響は同一であるとみなした。

鍛伸後の試料を切断し、1200°Cで3~100hrの加熱拡散をおこないEPMA用試験片を調整した。各試験片は砂型鋼塊の表面から約20mmの位置に相当する部

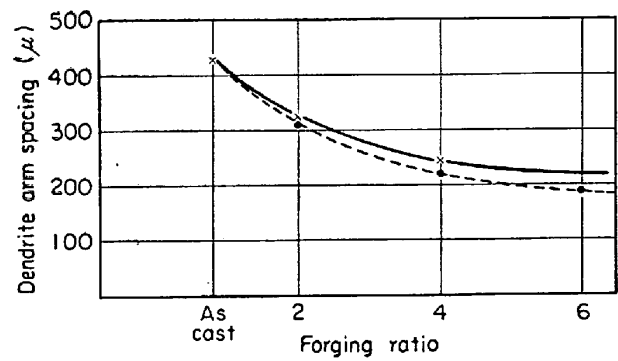
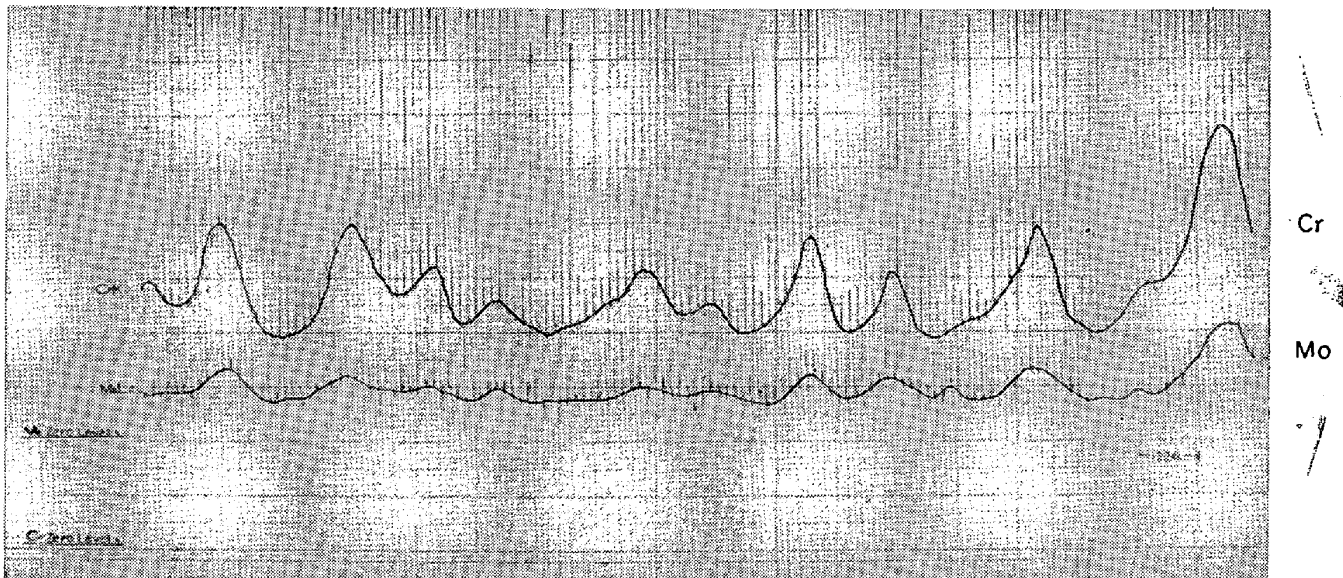
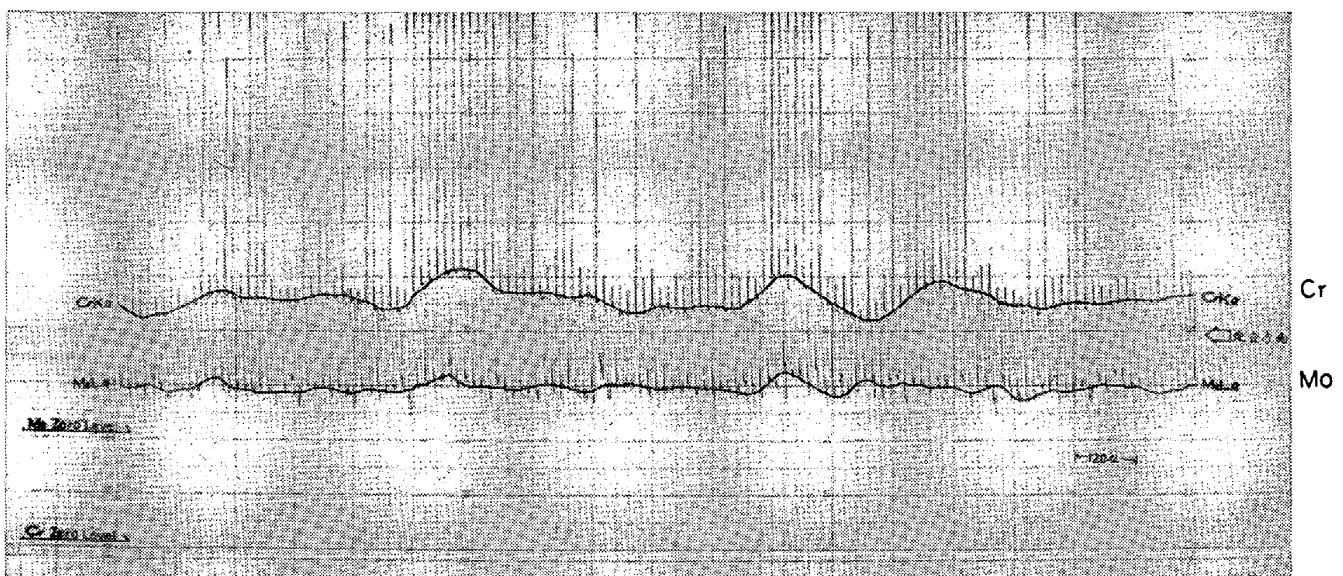


Fig. 4. Dendrite arm spacing of specimens.

分から採取し、測定面はすべて縦断面とした。なお、この位置における凝固速度は、金型鋼塊の表層より約80



(a) As-forged



(b) Homogenized for 10hr

Fig. 5. Electron probe scanning across dendrite arm of as-forged and homogenized (10hr) specimens,

mmの位置の凝固速度に相当する⁴⁾。

as-cast および 4.0S 鍛伸材の横断面のマクロ組織を Photo. 6 に示す。4.0S では dendrite の鍛造による破壊はほとんど進行していない。

残留マイクロ偏析の線分析に使用した装置は、前記のロール表面についておこなった EPMA と同一であり、分析条件も同様である。

走査距離は試料の鍛伸の程度すなわち dendrite アームの間隔によつて相違させ、10個以上のアームを横切るように設定した。

3.2 実験結果

3.2.1 dendrite アーム間隔

成分拡散は dendrite アーム間隔が小さいほど進行しやすいことは当然であるが、実際には dendrite は立体的に交叉しているためにその間隔を測定することはかなり困難である。本実験では EPMA による線分析の結果から山と山の平均距離を測定し、平均 dendrite アーム間隔とした。

各試料の平均 dendrite アーム間隔は Fig. 4 に示すとおりである。as-cast の状態では約 400 μ であり、鍛伸比の増加とともにアーム間隔は減少し、その傾向は図中に点線で示した径の減少率から計算した値とはほぼ一致している。

すなわちこのようにして測定したアーム間隔は、as-cast のアーム間隔と径の減少率から容易に推定できることを示している。

3.2.2 残留マイクロ偏析

Cr および Mo についての EPMA による線分析の結果の一例を Fig. 6 に示す。Cr と Mo は全く同一の偏析傾向を示しているが、両者の偏析の程度は若干ことなっている。

すなわち、偏析指数で比較した場合には Mo のほうがわずかに大きい。しかし Mo は含有量が少ないために測定値のばらつきも大きく、鍛伸比および加熱拡散の影響を比較するためには適当でない。

したがって、それぞれの線分析の結果から Cr の偏析指数を求め、Fig. 6 に示した。加熱拡散をおこなっていない場合の as-cast の偏析指数が、鍛伸比 4.0S の値より小さいのは砂型鋼塊の底部側から試料を採取したことによるものと考えられる。また測定値が全体にかなりばらついているが、鍛伸および加熱拡散の効果は十分認められる。

すなわち as-cast の状態で平均 dendrite アーム間隔が 400 μ の場合には、100 hr の長時間加熱によつても偏析指数は 1.3~1.4 程度に減少するのみであるが、

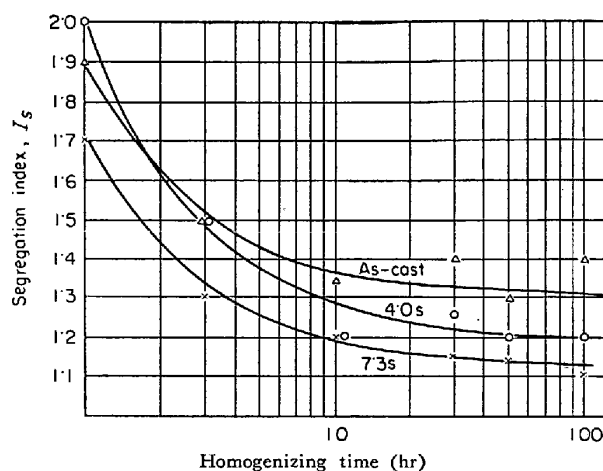


Fig. 6. Effect of forging ratio and homogenizing time on segregation index.

鍛伸比 4.0S でアーム間隔が 200 μ 程度になれば 10~30hr の比較的短時間加熱で偏析指数は、1.2~1.3 に低下する。

4. 考 察

4.1 肌荒れについて

圧延用ロールの表面肌荒れ状況の調査により、オレンジスキンの模様が浮彫りされるのは、ロールのマイクロ偏析の存在によることが明らかになった。すなわち、肌荒れ模様とマクロ腐食後との対比により、ロール表面に浮彫りされた模様は凝固時の dendrite 組織そのものであり、また EPMA による Cr の線分析の結果このような模様が現出するロールにおいては、約 40% の成分偏析が存在することも確認された。

この模様の現われる機構が、摩耗によるものか腐食によるものか明らかでないが、十分な潤滑油が使用される実際の圧延条件からは、腐食によるとは考えにくく、また次の理由からも否定されるであろう。

(1) マクロ腐食液(ゲー氏液)による強腐食によつても、dendrite 模様は容易には現出しないこと。

(2) 板道からはずれて摩耗の生じない部分にはこの浮彫り模様が全く認められないこと。

したがって浮彫り模様が生ずる主原因は、ロール表面におけるミクロ的不均一摩耗であろうと推定される。

このような不均一摩耗の生ずる原因としては、

(1) 炭素および合金元素量の偏析により、焼入れかたさが位置によつて相違する。

(2) 合金元素の偏析のために焼もどし抵抗がことなり、摩擦熱、変形熱の影響をうける表面部分のかたさに差を生ずる。

(3) 炭化物の不均一分布により耐摩耗性が相違するとともに摩擦条件にも影響をあたえる。

などをあげることができる。

マルテンサイトの焼入れかたさおよび 100~200°C の低温焼もどし後のかたさは、主として炭素含有量のみに影響されるが Cr および Mo などの合金元素の含有によつてもわずかに変化する²⁾。ロール表面における Cr および Mo などの合金元素の偏析は 40% 前後であり、さらにこのような炭化物との親和力の強い元素が偏在することによつて、オーステナイト化の際に炭素も偏析することとなり、焼入れかたさに差を生ずることは容易に考えられる。

Fig. 1 のかたさ測定結果では Hv 792~824 の範囲でばらついている。このかたさの差により、純粹ひつきき摩耗の場合には相対耐摩耗度で約 5% の差を生ずることとなる²⁾。冷延ワークロールにおける摩耗の機構はまだ十分に解明されているとはいえないが、接触面圧が比較的大きいことおよび Photo. 4 に見られるような流動層が存在することから凝着摩耗の生成が当然考えられ、さらに Photo. 3 のようなひつきき疵の存在することから、ひつきき摩耗も同時に生じているといえる。このような摩耗条件下においては、当然上記のようにロール表面にかたさの差が存在すれば、これが摩耗に影響を及ぼし凹凸を生ずるものと考えられる。

つぎに(2)の表層部における焼もどしの影響について次のような実験を追加した。すなわち基本成分として 0.83C-2.2Cr-0.24Mo 鋼をえらび、ロール表面および加熱拡散実験材についての EPMA 分析の結果から、実際に予想される偏析部成分に相当する試料を作製し、焼もどしかたさの比較をおこなつた。

試料の化学成分は Table 3 に示すとおりであり、30 kVA 高周波炉で 6 kg 鋼塊を溶製し、20 mm ϕ に鍛伸して実験に供した。なお炭素なども当然偏析するはずであるが、ここでは焼もどし抵抗性におよぼす合金元素の影響を明らかにするために、Cr, Mo および V のみをそれぞれ 10 および 30% 増加させた。また化学成分の均質化および炭化物の形成、分布を調整するために、1200°C \times 5hr の加熱後 790°C からの徐冷法⁷⁾によつて、炭化物の球状化をおこなつた。

この試料を 860°C \times 2hr 加熱後油冷し、600°C までの各温度で 2 hr 焼もどしをおこなつた場合のかたさを Fig. 7 に示す。この結果によれば焼入れおよび焼もどしかたさは、合金元素量が基本成分に比較して 30% まで増加しても、ほとんど変わらないことを示している。しかし、実際には C% の差によりある程度相違することは考えねばならない。

(3)の摩耗におよぼす炭化物の影響については、定量

Table 3. Chemical composition of specimens.

	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
No 1	0.85	0.21	0.35	2.23	0.24	0.09
No 2	0.85	0.26	0.38	2.42	0.27	0.13
No 3	0.85	0.26	0.34	2.90	0.35	0.16

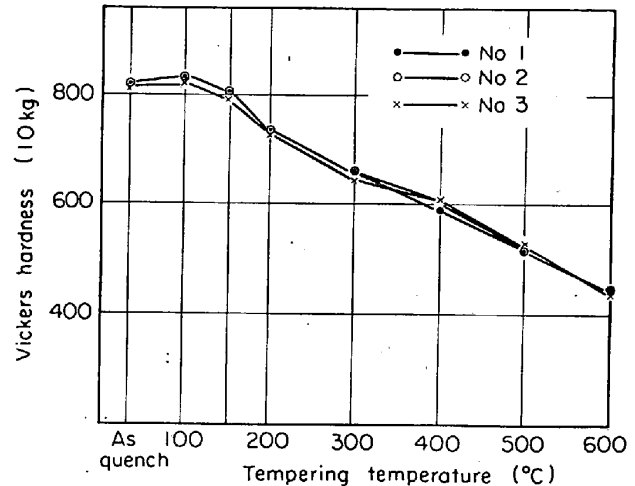


Fig. 7. Effect of alloy contents on tempering hardness.

的把握は不可能であるが、Photo. 4 に見られるように炭化物の存在がロール表面の流動状況に影響を及ぼしていることおよび Photo. 5 の炭化物分布がデンドライトのアーム部と樹間部とで相違していることなどから、摩擦条件および耐摩耗性に及ぼす炭化物の影響はかなり大きいであろうと推察される。

4.2 ミクロ偏析とその均質化について

多元合金の凝固に際し溶質元素のミクロ偏析が生ずることは避けられない。またロール表面の肌荒れはその機構のいかにかわからず、ミクロ偏析の存在がその原因であることも明らかとなつた。

したがつて冷延ワークロールの肌荒れ抵抗性を改善するためには、まずミクロ偏析を軽減することを検討せねばならない。

凝固組織の粗密および偏析の程度は凝固速度に大きく影響されるが²⁾、冷延ワークロール用の鋼塊は一般に 6~20 t (800~1300 mm ϕ) 程度の大型鋼塊であるので、凝固速度を極端に大きくすることは不可能である。したがつてこのような大型鋼塊の凝固組織を微細化するためには、人為的に溶鋼中の結晶核を増加させるなどの方法を採用せねばならない。その方法としてスクレーパー法⁸⁾、傾注法⁹⁾などが報告されている。田代¹⁰⁾も凝固時の溶鋼に機械的振動をあたえることによる微細化方法を開発し、この方法の適用により 1100 mm ϕ の鋼塊の表面

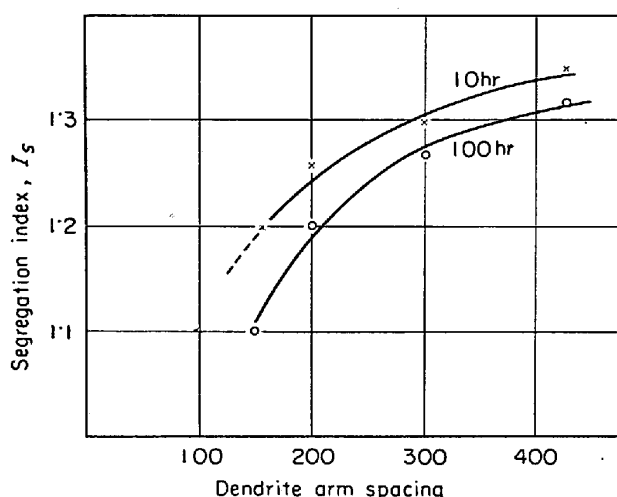


Fig. 8. Relation between dendrite-arm spacing and segregation index. (homogenizing temperature : 1 200°C).

から 100~150 mm 内部におけるデンドライト域でのアーム間隔を 300~350 μ にすることに成功した。

またワークロールの場合は表層部で片側 30~60 mm 使用されるのみであるから、鑄型側壁からの冷却速度を大にし、微細な柱状晶組織とすることも有効であろう²⁾。

一方、本実験の結果から平均デンドライトアーム間隔と偏析指数の関係を求めれば Fig. 8 のとおりである。この図からアーム間隔が 400 μ 程度であれば 1 200°C × 100hr の加熱によつても偏析指数は 1.3 以上であるが、200 μ 以下になれば 100hr の加熱によつて 1.2 まで均質化されることがわかる。

この値は M. C. FLEMINGS¹⁾の結果とほぼ一致するが、彼等の実験によればデンドライトアーム間隔 48 μ の試料を 1 175°C で 6 hr 加熱しても偏析指数は 1.14 であり凝固組織の完全均質化はきわめて困難であるとしている。

しかしロール表面から採取した試片 (Fig. 2 のかたさ分布測定試料) を 860°C に再加熱後油冷し、130°C × 3 hr の焼もどしをおこなつて再度かたさ測定を実施した結果では Hv 824 で全くばらつきは見い出されず、また偏析指数 1.2 の試片 (鍛伸比 4.0 sec, 10hr 加熱材) の焼もどしかたさも均一であつた。さらに後者の場合には炭化物分布の不均一性もほとんど認められない。一般に軸受鋼やワークロールの焼入れの場合は、5~10% の炭化物を残留させるために全炭素量が高くて地質に固溶した炭素量は 0.5~0.6% となり¹²⁾、したがつて偏析がはげしくさらに焼入れ温度が低い場合には、Fig. 2 に示されるような Hv 800 以下の低いかたさの部分が生ずる

ものであろう。しかしある程度の偏析があつても焼入れ温度を十分高くすれば上記のように均一かたさをうることは可能である。

さらに炭化物の大きさおよび分布も焼入れ前の予備熱処理によつて大きく影響されるので¹³⁾、ある程度の偏析が残留しても実用上さしつかえない程度の均一性をうることは可能であり、本実験の結果から偏析指数 1.2 以下を目標とすべきであらう。

5. 結 言

冷延用ワークロールの表面肌荒れについて調査し、さらにその改善に関する若干の実験をおこなつた。

その結果を要約すれば次のとおりである。

(1) オレンジ・スキンといわれる肌荒れの生ずる原因は、ロール表面におけるマイクロ偏析によつて摩耗の差を生ずるためである。

(2) この場合 EPMA によつて Cr について線分析した結果では、その偏析指数は約 1.4 である。

(3) この Cr などの偏析によりかたさおよび炭化物分布に不均一性を生ずることが、肌荒れの直接の原因とみなされる。

(4) 偏析指数 1.2 以下の高い均質性をうるためには、鍛造後のロールのデンドライトアーム間隔を 200 μ 以下にすることが必要であり、さらにこの状態で 10hr 以上の長時間高温加熱をおこなわねばならない。

(5) 偏析指数 1.2 以下であれば、そのロールの化学成分と偏析の程度に相応した熱処理をおこなうことにより、かたさおよび炭化物分布を十分均一にすることができる。

おわりに、本研究に対して有益なご助言を賜つた田代研究部長に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) V. A. NIKOLAEV: *Stal in English*, (1969) 2, p. 196
- 2) M. C. FLEMINGS, et al.: *Trans. Met. Soc. AIME*, 236 (1966), p. 624
- 3) R. D. DOHERTY and D. A. MELFORD: *JISI*, 204 (1966), p. 1131
- 4) 田代晃一, ほか: 三菱製鋼技報, 2 (1968), p. 1
- 5) K. J. IRVINE, F. B. PICKERING, and J. GARSTONE: *JISI*, 196 (1960), p. 66
- 6) 佐藤: 金属の摩耗とその対策, (1965), [養賢堂]
- 7) 竹下, ほか: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 499
- 8) 高橋, ほか: 金属学会誌, 29 (1965), p. 637
- 9) 大野: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 230
- 10) 田代, ほか: 未発表 (三菱製鋼社内報告)
- 11) M. C. FLEMINGS: *JISI*, 208 (1970), p. 371
- 12) 武田, ほか: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 47
- 13) 渡辺, ほか: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1353