

は顕著な差異が認められる。したがってこの差異は Al の添加によるものであると考えられる。

4. V を添加した鋼材に認められる砂疵の構成成分中には V 化合物の存在は認められない。この事実は V の添加が砂疵に本質的な影響を与えないことを示すものである。

5. また本実験結果によれば、砂疵の光学顕微鏡的形態ならびに現出形態と各種の方法によつて認定した砂疵構成成分との間には Table 5 に示したように密接なる関連性がある。したがって鋼種、脱酸条件およびオーステナイト結晶粒度調整条件などの明らかな場合には砂疵の光学顕微鏡的観察のみによつて、その構成成分を迅速にしかもかなり適確に認定することが可能である。

V. 結 言

各種実用鋼材に発生する砂疵について光学顕微鏡的観察ならびに砂疵を構成する非金属介在物の腐食試験、反射電子線回折、定性分光分析ならびに化学分析などをおこない、(i) 砂疵の光学顕微鏡的形態および現出状態、

(ii) 鋼材の脱酸およびオーステナイト結晶粒度調整条件、(iii) いろいろの方法によつて認定した砂疵構成成分などの間には互いに密接な関連性のあることを認めた。さらにこれらの実験結果にもとづいて、光学顕微鏡観察のみによつて砂疵を構成する非金属介在物を迅速にしかもかなり適確に認定できることを指摘した。

(昭和36年2月寄稿)

文 献

- 1) 日本鍛鋼会技術委員会: “鍛鋼品不良原因類別” (1954), 日本鍛鋼会
- 2) P. F. KERR: “Optical Mineralogy”, 3rd edition, (1959), McGraw-Hill Book Co., Inc.
- 3) 日本学術振興会: “鉄鋼化学分析全書” 下巻 (1952), 日刊工業新聞社
- 4) 日本学術振興会: “鉄鋼迅速分析法”, (1956), 丸善株式会社
- 5) Amer. Soc. Test. Mat.: “Metals Handbook” (1939)
- 6) 成田貴一, 森憲二: 鉄と鋼, 46 (1960) p. 19
- 7) Amer. Soc. Test. Mat.: “ASTM X-ray Powder Data File”, (1942~1956)
久保輝一郎, 加藤誠軌: “X線回折による化学分析”, (1955), 日刊工業新聞社

焼入鋼の表面硬度におよぼす加工変質層の影響*

荒木田 豊**・柴崎 鶴雄**

Influence of the Machined Surface Layer on Hardness of the Surface of Hardened Steel.

Yutaka ARAKIDA and Tsuruo SHIBAZAKI

Synopsis:

When the steel surface was finished by mechanical process, for example, turning, grinding and mechanical polishing, its surface is covered by the layer in which the physical and mechanical properties differ from those in mother material. The authors tentatively called this layer in terms of the “machined-surface-layer”. Although it is said that the influence of this layer on mechanical strength of a material is of no negligible amount, but many questions are still left unsolved. Especially in previous studies, only discussions on the influence of residual stress in the surface layer were described, and no attention was paid to the work hardening and other factors.

This paper presented the results of an investigation into the influence of the machined-surface-layer on hardness of the surface of hardened steel. Distribution of the half-value breadth of X-ray diffraction patterns on the ground surface layer was obtained with small specimens heat-treated under various conditions. Then, hardness tests were carried out on the surface layer of Sendzimir rolls finished by some mechanical process. The results of these studies were as follows:

* 昭和 35 年 10 月本会講演大会にて発表 ** 株式会社日本製鋼所室蘭製作所研究所

(1) Two types of machined-surface-layer were observed. One of these had a monotonous distribution of half-value breadth under the surface and the other had the minimum value of half-value breadth directly under the surface. This phenomenon was explained by a "competition" happened between mechanical action and thermal action.

(2) The distribution of half-value breadth corresponded with the distribution of hardness. Therefore, the depth of the machined-surface-layer could be determined by the measurements of the distribution of half-value breadth.

(3) The strong work-hardening was observed on the machined-surface-layer of a Sendzimir roll finished by turning. It is necessary to remove the surface about 300 μ thickness by grinding in order to obtain the reasonable value of Shore hardness.

I. 緒 言

鋼材を、たとえば切削、研削、たく磨などの機械的な方法で仕上げると、その表面の近傍がもとの材料と物理的および機械的に性状を異にする薄層でおおわれる。この層を加工変質層と呼び母材と区別することにする。この層が鋼材の機械的強さにおよぼす影響、たとえばクラックの疲れ強さ、ロールのはく離などにあたえる影響は無視できないと考えられているが、系統的な研究がなされていないので不明確な点も多い。たとえば、研削仕上げによつて鋼材の表面に残留する加工変質層が疲れ強さにおよぼす影響について TARASOV らが報告した結果²⁾に代表されるように、その注目するところは表面層の残留応力の影響だけであつて、硬度や塑性変形域の深さなどの影響については深くふれていない。著者らの一人はこの点に考慮しながら鋼材の加工変質層を観察して来たが^{3,4)}、この報告ではいろいろの熱処理をあたえた鋼材の表面を、一定の条件の研削によつて仕上げるときに生ずる加工変質層の形態を、実験室的に調達した小試験片についてしらべるとともに、それが表面の硬度におよぼす影響について検討し、さらに完成硬度にむらが生じたために問題となつていた実体のロールについて二、三の実験をおこない、その原因が加工変質層の形態の変動にあることを明らかにした。

II. 供 試 材

本実験はこれを2群にわけておこなつたが、記述の都合上それぞれを実験1、および実験2と呼ぶことにする。実験1は、実験室的に調達した小試験片を対象に、また実験2は、実体のロールから切り出した試験片を対象にして進めた。

(1) 実験1

化学成分および熱処理がそれぞれ Table 1 および Table 2 であるような試験材を、Table 3 に示す条件で平面研削によつて仕上げた。試験材はあらかじめ熱間鍛造により 15mm×15mm×40mm の角柱に成形したの

ち熱処理を加え、つぎにフライス切削および平面研削によつて 8mm×8mm×40mm の形状にした。脱炭層はこの工程で完全に除去できた。さらにこれらの試験片は全数をかさねることなく平面定盤の上にならべ、外側から鋼製のわくで緊定して一体となし、その状態のまま試験片の表側の面および裏側の面を平面研削によつて十分平たんに仕上げた。以上が準備工程である。つぎにこれらの試験片を、わくじめのまま Table 3 に示した条件で最終的に仕上げた。Table 3 に示した仕上げ条件は、準備工程で加えられた切削および研削による影響層を除去し、かつ最終仕上げに対応する加工変質層だけを試験片に残留せしめるような考慮のもとに決めたものである。すなわち同表にみられるように、小さな切込量で反覆して研削するようにしたのがそれである。一般の鋼材

Table 1. Chemical composition of steels used in the 1st experiment.

C	Si	Mn	P	S
0.46	0.30	0.75	0.026	0.014
Ni	Cr	Mo	V	Cu
0.55	1.19	0.36	0.09	0.17

Table 2. Conditions of heat treatment of specimens used in the 1st experiment.

Marks of specimens	Conditions of heat treatment
A-1	850°C / 2h O.Q.
A-2	850°C / 2h O.Q. → 100°C / 2h F.C.
A-3	850°C / 2h O.Q. → 200°C / 2h F.C.
A-4	850°C / 2h O.Q. → 300°C / 2h F.C.
Marks of specimens	Conditions of heat treatment
A-5	850°C / 2h O.Q. → 400°C / 2h F.C.
A-6	850°C / 2h O.Q. → 500°C / 2h F.C.
A-7	850°C / 2h O.Q. → 650°C / 2h F.C.
A-8	850°C / 2h F.C.

Table 3. Finishing conditions fixed for the 1st experiment.

Milling	
Tool	S 2
Rotation of main axis	134 rpm
Feed	47mm/mm
Depth of cut (1)	0.3mm × 1
Depth of cut (2)	0.2mm × 1
Cutting fluid	None
Grinding	
Wheel	WA46m IV (210mm φ)
Wheel rotation	2250 rpm
Feed	2.0mm
Wrok speed	5.4mm/mm
Depth of cut	0.01mm × 10
Grinding fluid	Used (a soluble oil)

を研削する場合には、研削条件がそれほど特殊なものではなければ、その加工変質層の深さは 100 ないし 150 μ 程度であり³⁾、かつその変質の程度は表面から内部にかけて双曲線的に減少しているから、上述の反覆研削によつて除去される厚みは十分な量であると考えられる。

(2) 実験 2

試験材として実体のゼンジミヤロールをえらんだ。その化学成分および熱処理は Table 4 のとおりである。このロールは、その工程を迅速にするために熱処理後その胴部を旋盤によつて粗削りし、つぎに最終的にこれを研削仕上げるのであるが、完成硬度(ショアー)にむらが生ずることが再三あつた。この原因はその熱処理条件に見出すことができなかつたので、上述の切削および研削によつて残留していると考えられる加工変質層が、それぞれ完成硬度に影響をおよぼしているのではないかと考え、これを確かめるためつぎに述べる実験をおこなつた。供試ロールは試験片を切り出すのに先立つて Fig. 1 に示す要領で機械仕上げした。すなわち B-1 部は研削のみで、B-2 部は切削したのち軽い研削で、B-3 部は切削のみで仕上げた。切削および研削の条件はそれぞれを Table 5 に一括した。つぎにこのロールの B-1、

Table 4. Chemical composition and heat treatment of the Sendzimir roll used at the end experiment.

C	Si	Mn	P	S	Cr
1.5	0.3	0.3	0.03>	0.03>	12.0
Mo	V	Co	Conditions of heat treatment		
0.8	0.5	0.5	1050°C O.Q. → 150°C A.C.		

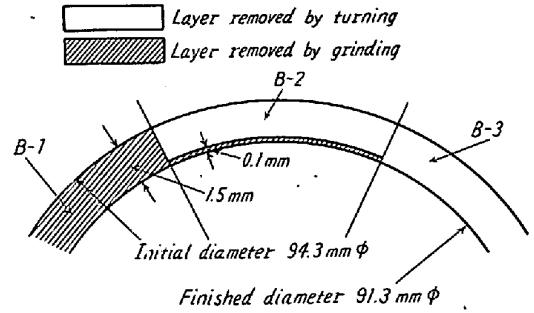


Fig. 1. Finishing procedure of the tested roll.

B-2, B-3 各部から Fig. 2 に示すような試験片を切り出して実験に供した。

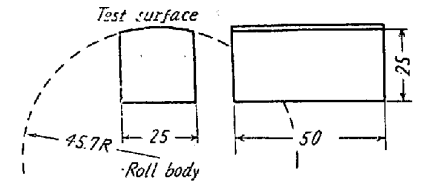


Fig. 2. Size of the specimen cut out from the roll body.

III. 試験方法

加工変質層の形態をしらべるために X 線試験および硬度試験をおこなつた。実験の目的上、試験片の表面の近傍における変化量を求めなければならないので、このためとくに逐次電解研磨法をもちいた。すなわち、まず試験片表面について X 線試験および硬度試験をおこない、つぎに電解研磨によつて所定の厚さだけ表層を除去し、その結果得られる面についてふたたび X 線試験および硬度試験をおこなうという順序を反覆した。電解研磨装置は Disa Electropol を用い、電流密度 3.1A/cm²、1 回の研磨時間を 30s とした。この条件で試験片表面は 5 μ 厚さ除去されること、および処理後の試験片の温度はたかだか 70°C であることを、あらかじめ予備試験によつて確認した。

X 線試験は、対陰極 Fe、最高電流 10mA の X 線発生管球を装備した Iso Debyeflex III をもちいておこなつた。直径 110mm

の背面反射カメラにより、試験片のマルテンサイトまたはフェライトの面 (220) からのブラッグ反射を撮影し、このようにし

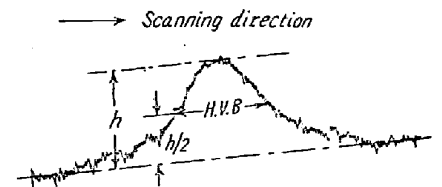


Fig. 3. Half-value breadth of intensity curve of the X-ray diffraction pattern.

て得られた回折環は自記式マイクロフォトメータによつて強度曲線になおし、さらに Fig. 3 に示す要領でその半価巾を求めた。

硬度試験には Durimet をもちい、測定荷重を 100g

とし、10回の測定の前加平均値をもつて代表硬度値とした。またこのほか、実体のゼンジミヤロール2本（材料符号CおよびD）を逐次研削し、その表面硬度をショアーで求めた。このときの測定点はロールの全長にわたり40箇所とした。

IV. 実験結果

(1) 実験1の結果

研削仕上げを加えたままの面のX線回折像は、その巾がいちじるしく散大している。しかし逐次電解研磨によつて表層を除去するにしたがつてその度合が変化し、最終的にある個有の巾に落ち着くが、この変化の形態はふたつの型に分類できる。すなわち、そのひとつは深さが増すにしたがつて巾が減少しだいに鮮鋭になつてある一定の巾に落ち着くもの、これに対して他のひとつは、いつたん鮮鋭になる傾向を示したのちふたたびしだいに散大し、そのままある一定の巾に落ち着くもののふたつである。前者は焼戻し温度の高い試験片が示す変化であり、Fig. 4にその例を示した。これに対して後者は焼戻し温度の低い試験片が示すもので、Fig. 4にその例をも添えた。これらの傾向を、その半価巾の変化によつて表示してみると Fig. 5 のようになる。試験片の記号およびその熱処理条件は Table 2 に示したとおりである。半価巾が一定値に落ち着く深さは100ないし150 μ であつて、その絶対値は焼戻し温度が高くなるほど小さくなつてい

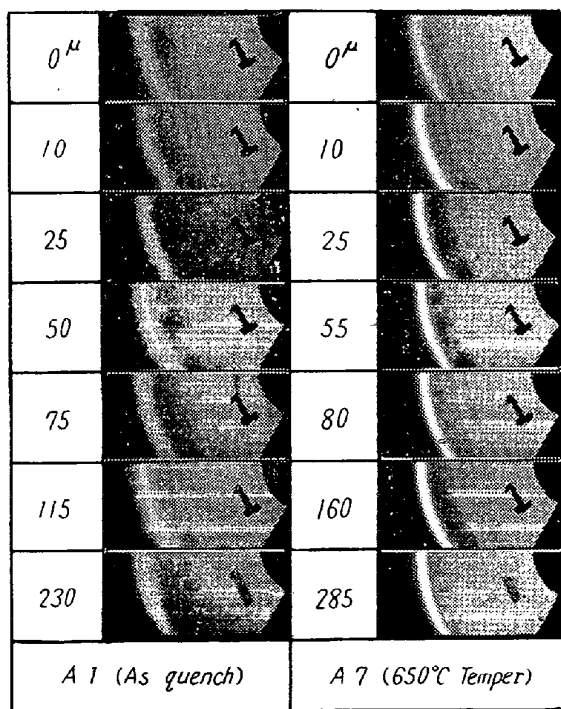


Fig. 4. X-ray diffraction patterns in the ground-surface-layer.

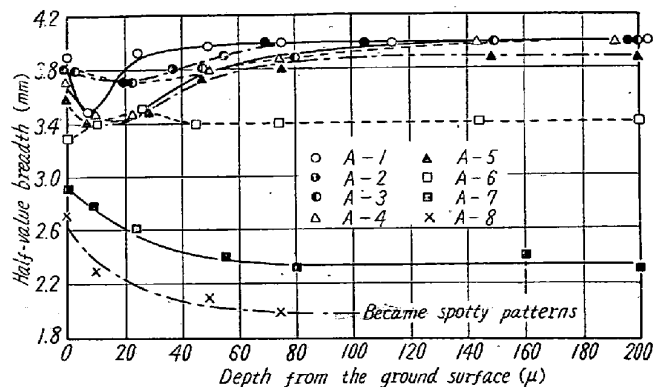


Fig. 5. Distribution of half-value breadth of the X-ray diffraction pattern in the ground-surface-layer of various specimens.

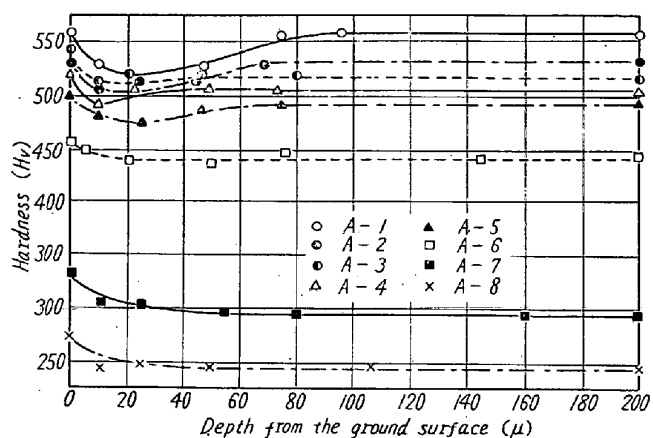


Fig. 6. Hardness distribution in the ground-surface-layer of various specimens.

る。試験片の表面直下に観察される半価巾分布の極小点における絶対値は、かならずしも焼戻し温度の高低に左右されていないが、極小点そのものは焼戻し温度 500 $^{\circ}$ C以下の試験片のすべてに認められる。焼戻し温度が650 $^{\circ}$ C以上になると、深部の回折像は斑点化し、そのままでは半価巾を表示できなくなる。

一方硬度試験の結果は Fig. 6 に示すように半価巾が示す分布とその傾向が同様である。試験片の記号およびその熱処理条件は Table 2 に示したとおりである。すなわち、焼戻し温度の高い試験片においては、硬度は表面から内部にかけて単調に減少し一定値に落ち着くが、焼戻し温度の低い試験片においては表面直下に極小点が観察される。

(2) 実験2の結果

硬度試験の結果を Table 6 に示した。この表には、試験片が切り出される前に、実体のロールの一部としてあつた場合にその部分で測定したショアー硬度の値を添えてある。また B-2 部および B-3 部の境界に、切削条こんが完全にはとれない程度のごく浅い研削仕上げを

Table 5. Finishing conditions fixed for the 2nd experiment.

Grinding			Turning	
Mark of specimen	B 1	B 2	Mark of specimen	B 3
Wheel	SA46m IV (687 mm ϕ)	SA46m IV (687 mm ϕ)	Tool	TH 1
Wheel rotation	1550 rpm	1550 rpm	Cutting speed	3.8m/mn
Work rotation	30 rpm	45 rpm	Feed	0.19mm/r
Feed	—	570mm/mn	Depth of cut	1.5mm
Depth of cut	0.005mm/r	0.01mm	Cutting fluid	None
Grinding fluid	None	None		

Table 6. Hardness in the machined surface-layer of the specimens cut out from the tested roll.

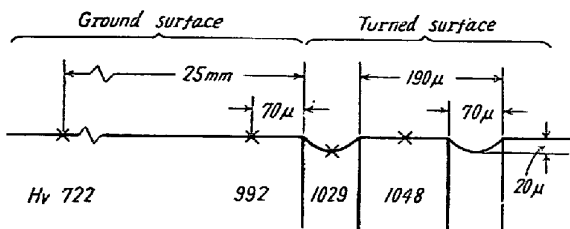
Marks of specimens	Hardness tester		Micro-Vickers		
	Depth from surface	Shore	Micro-Vickers		
		Surface	Surface	100 μ	300 μ
B-1		82.0	725	680	735
B-2		90.5	720	720	755
B-3		95.0	1050	740	745

加えた部分を残し、この部分について硬度試験をおこなった結果を Fig. 7 に示した。これらの結果によると、ショアー硬度は B-1, B-2, B-3 の順に高くなっている。これに対して微少硬度の値は、試験片表面では B-1 B-2, の間に差異がなかったが、B-3 がきわめて高くなっている。しかし表面から内部に 300 μ 入った位置では、それぞれの試験片の間に差異が認められなくなる。Fig. 7 の結果は、切削条こんの近傍の硬度がきわめて高いことを示している。また切削条こんから距離が大きくなるにしたがって硬度が低下する。

つぎに逐次研削をおこなったロールについて測定したショアー硬度の変化を Fig. 8 に示した。研削により除去される厚さが大きくなるにしたがって硬度が減少し、300 μ にいたってほぼ一定値となる傾向は、2本の供試ロールとも同様であった。

V. 考 察

(1) 研削によって残留する加工変質層の形態



× mark indicates the position for measured hardness.
Fig. 7. Hardness of the turned and ground surface of the tested roll.

研削によつて鋼材の表層に残留せしめられる加工変質層の形態はふたつに大別される。そのひとつは焼鈍または焼入後 500°C 以上で焼戻した試験片に観察されるもので、表面から内部にかけて半価巾および硬度が単調に減少するものである。これに対して他のひとつは焼入または焼入後 500°C 以下で焼戻した試験片に観察されるもので、表面直下に半価巾

および硬度の極小値が存在するものである。機械的な加工にもなつておこる塑性変形はX線回折環を斑点像から連続環に、さらに連続環から散大像に変化させる傾向を持つている。これに対して結晶回復または再結晶によつてX線回折環はその逆の変化をたどることが知られている。したがつて回折環の巾によつて加工度を定量的に求めることは、原理的に可能であるが、結晶粒の大きさが同時に回折環の巾に影響をおよぼすので、加工度だけを取り出すことは実際にはむずかしい問題とされている⁵⁾。しかしこの実験で用いた試験片の表面層における半価巾の変化は、母材の半価巾の値を規準にして評価することができる。すなわち、まず母材の半価巾の値と異なる領域を知ることができる。つぎにその半価巾の変化の方向を知ることができる。前者は加工変質層の深さを

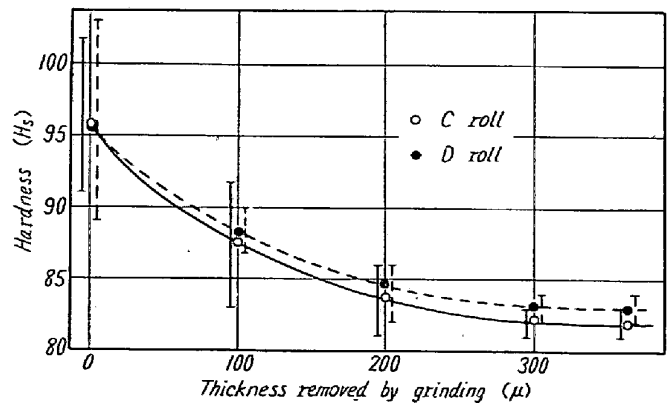


Fig. 8. Change of hardness on the surface of the Sendzimir roll during successive grindings.

あたえ、後者はそのときの仕上げ条件に対応する表面効果の内容の定性的な解釈をあたえるものである。とくに前述のように加工変質層にふたつの形態ができる理由については、つぎのように考えられる。

研削によつて鋼材の表面に加えられる作用を、機械的なものと熱的なものとに分けることができるとする。前者は被削材表層に塑性変形をひきおこし、その結果半価巾を増大させる方向に作用するに対し、後者は結晶回復または再結晶をあたえその結果半価巾を減少させる方向に作用するものと考えられる。機械的作用の大小は、鋼材の硬度に左右され、高硬度のものほど変形抵抗が大きくなり、その結果塑性変形がおよぶ深さおよびその程度が小さくなる²⁾。焼入鋼または焼入後低温で焼戻された鋼は高硬度であるため被削性が悪く、加工変質層も本来はきわめて浅いものと考えられる。研削によつて鋼材の表層に加えられるエネルギーはこのような場合には主として熱的作用を通じて消費され、そのため表面層の再結晶または結晶回復がおこると考えられる。したがつて表面層が局部的に軟化し、さらに軟化による変形抵抗の減少により機械的作用を2次的にうけるようになるものと考えられる。これらの過程を図示すると Fig. 9 のようになる。(a)は研削前における材料の半価巾分布である。これに対して(c)はいろいろな半価巾を持つている材料(材料の半価巾は熱処理または冷間加工によつてあるきまつた値を示す)を一定の条件で研削する場合に機械的な作用をうけて、その表層の半価巾の値が増加することを示している。(a)は研削によりまず熱的作用をうけて、その表層の半価巾を減少しその結果として(b)に示す半価巾分布に変化する。このような状態になると表層の各部分に前述の(c)によつて示される分量の半価巾増加をあたえるだけの機械的作用が加わり、その結果

として(d)のような半価巾分布をとるにいたるのである。KoistinenらはX線回折環の変化から、焼入鋼の研削面に焼戻しがおこりそのために変態応力が残留すると報告⁷⁾しているが、表面に2次的に加えられると考えられる機械的作用については指摘していない。

焼戻し温度が高くなると材料の硬度が低くなるので、熱的作用が小さくなるとともに機械的作用が増大し、このような場合には半価巾の分布は表面から内部にむかつて単調に減少するようになるものと考えられる。

(2) 焼入鋼の研削仕上げ面の硬度におよぼす加工変質層の影響

焼入鋼の研削仕上げ面直下の硬度はある研削条件のもとでは、母材のそれより低い値を示すが、表面の値は母材のそれと大差ない。しかしこの実験結果は、研削に先立つておこなわれる粗削りの影響のない場合について得られたものである。一般の材料の仕上げ研削においては研削量が小さいため粗削りの影響が仕上げ面に残留しているような場合も考えられる。Fig. 7 に示したように、ロールの切削面の切削条こん周辺の硬度はきわめて高く、材料が切削により粗削りされている場合には、これにより残留する加工変質層の加工硬化を無視することは危険である。Table 6における結果では、試験片B-3の表面から100 μ の深さにおける微少硬度の値はHv=740であつて、母材の平均硬度Hv=740 \pm 10の範囲に入つている。したがつて切削による加工変質層の深さは100 μ 以下であると考えられる。試験片B-2はこの切削面を研削によつて100 μ だけ除去したものであるが、その表面の微少硬度はHv=720であつて実際加工硬化層が完全にとりのぞかれている。しかしこの値は表面から100 μ の深さにおける値とともに母材のそれより低くなつている。これは、実験1において述べた熱的作用の影響によるものであると考えられる。この傾向は、研削のみで仕上げた試験片B-1についてはさらに顕著であつて、硬度分布の極小点と目される低硬度の部分が表面から100 μ の深さに認められる。しかし、いずれの場合にも表面から300 μ の深さにおいては母材硬度と一致する。

一方ショアー硬度は、B-3, B-2, B-1の順に低くなつている。またFig. 8に示した結果も、これと同様な傾向を示している。ここで問題となるのは、切削による加工変質層の加工硬化は、微少硬度測定のためにおこなつた100 μ の電解研摩によつて消去できたにもかかわらず、これを研削によつておなじ100 μ だけ除去した面について測定したショアー硬度の値が、このロールの母材硬度とみなされるHs=82.0に落ち切つていない点

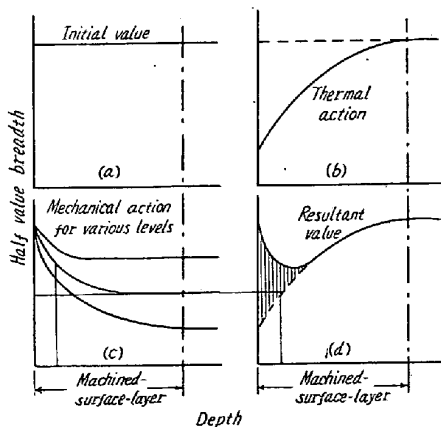


Fig. 9. Competition caused between thermal action and mechanical action and resultant H.V.B.

である。これについてはつぎのように考えられる。

切削によつてロール表面に残留している加工硬化層は 100μ の研削によつて除去されなければならない。しかし、その場合の研削の効果は加工変質層に加えられるものである。いまその効果が、直接母材に作用する場合と比較して差があるものと仮定する。このような場合には、研削の初期に発生する研削自身による加工変質層と研削がある程度進行して切削により残留している加工変質層が相当量除去されたのちに発生するそれとの間に差異が生ずると考えられる。これらは研削の進行過程で逐次干渉しあつて、最終的にある安定した加工変質層に漸近するであろう。Fig. 8 に示した結果は、この考え方を支持するものであり、かつこの試験条件では、その状態を得るためには 300μ の研削が必要であることを示している。実際には、これに実験 1 で示したような機械的作用と熱的作用との拮抗現象がからむので、研削量の小さなうちの加工変質層の変動は、さらに不安定なものとなるであろう。Table 6 における深さ 100μ の点の微少硬度が、研削量の異なる試験片 B-1, B-2 の間で相異していることも上述の考え方で説明される。ただしこの場合、研削量が多い試験片 B-1 の方が低硬度を示している点が注目されるが、これは、熱的作用の大小は材料の硬さだけできまるものではなく研削時間あるいは研削の反覆が同時に影響するものであることを示唆するものである。

以上を総合すれば、切削の影響をのぞき安定したショーア硬度を仕上げ面上で得るためには、研削量を 300μ としなければならないことが明らかである。上述の実験結果は、そのような場合でも、微少硬度分布を求めてみると表面直下に極小点が存在することを示しているが、これが一般の焼入鋼の研削仕上げにおいて不可避な現象かどうかに関しては、さらに検討の余地がある。

VI. 結 言

試験片および実体のロールをある条件で研削または切削してその表層を X 線試験および硬度試験を通じて観察し加工変質層の形態をしらべた。さらに研削仕上げが焼

入鋼の表面硬度におよぼす影響について検討を加えた。これらの結果はつぎのように要約される。

(1) 研削仕上げの結果鋼材の表層に残留する加工変質層にはふたつの形態がある。そのひとつは半価巾分布が研削表面から内部にむかつて単調に減少するもの、他のひとつは研削表面直下で半価巾分布が極小値を持つものである。このことは、研削の過程で機械的作用および熱的作用の間に拮抗がおこることによつて説明される。

(2) 半価巾の分布と微小硬度の分布とはほぼおなじ傾向を示す。したがつて半価巾の分布を求めることによつて、加工変質層の深さおよびその塑性変形量を比較することが可能である。

(3) 実体のロールを切削すると強い加工硬化をともなつた加工変質層が深さ約 100μ にわたつて残留する。しかしこれを研削によつて仕上げる場合には、その初期の段階では加工変質層の干渉がおこるため研削の効果が安定しないので、完成硬度を常に適正值と思われる値にするためには 300μ の研削量が必要である。

最後に本研究の発表にあたり、日本製鋼所室蘭製作所所長常務取締役皆川孝光氏および同副所長取締役伊佐治勝利氏に深謝し、御指導御鞭撻をいただいた同所研究所長下田秀夫博士に御礼申し上げる。

(昭和 35 年 12 月寄稿)

本 献

- 1) E. K. HENRIKSEN: Trans. Amer. Soc. Mechan. Eng., 73 (1951), Jan. p. 69~76
- 2) L. P. TARASOV, et al: Proc. Amer. Soc. Test. Mater., 57 (1957) p. 601~622
- 3) Y. ARAKIDA and A. TAKAOKI: Proc. Fourth Jap. Cong. Test. Mater. 掲載予定
- 4) 渡辺, 荒木田, 本間: 日本機械学会講演会 (昭35年4月, 東京) にて発表 同学会論文集に投稿中
- 5) B. E. WARREN and B. L. AVERBACH: J. Appl. Phys., 21 (1950) p. 595~599
- 6) 荒木田: 日本機械学会講演会 (昭35年10月, 札幌) 前刷
- 7) D. P. KOISTINEN and D. E. MARBURGER: Internal Stress and Fatigue in Metals, (Proc. of the Symp. on Internal Stress and Fatigue in Metals, 1958) p.110~119