

論 文

UDC 669.15²782-194-42 : 621.771.016.3 : 621.771.014

ロール表面に溝をつけて圧延することによる3%珪素鋼板の加工度分布の変化について*

熊沢 増治**・岩山 健三***・菅 洋三****

Effect of Cold Silicon by Grooved Rolls on Internal Strain of 3% Silicon Steels

Masuji KUMAZAWA, Kenzō IWAYAMA, and Yōzō SUGA

Synopsis:

Generally, the higher the residual strain which is introduced by rolling, the more effective the development of (100) recrystallization in 3% silicon steels. In order to confirm this effect and to clarify the mode of deformation involved, an experiment was conducted on work hardening by rolling between grooved rolls.

The experimental results are as follows.

- (1) As compared to ordinarily cold rolling, internal strains of about 1.3—1.5 times were obtained by groove rolling and succeeding smooth rolling.
- (2) Grooved rolled specimens generally exhibit far greater hardness in their center than on the surfaces. This is due to irregular deformation from groove rolling which induces extensive internal structural change.
- (3) As compared to ordinarily cold rolled steels, cold groove-rolled specimens exhibit considerable work hardening by the following rolling on the flattener of a smoothing roll. This is due to grooved-roll protrusions wedged into the matrix under flattener pressure by that is termed the wedging action.

1. 緒 言

著者らの一人は¹⁾冷延集合組織におよぼす溝ロール圧延の影響とその変形様式について検討を行った。その結果、この方法は(100)冷延集合組織の形成に効果的であることが示された。また、溝ロール圧延に相当する変形を与えたときの材料の流れについて観察したところ、(1)、不規則な変形が行われる。(2)、幅拡がりの現象を生ずる。(3)、回転を伴う材料の流れが認められた。そしてこの(3)の現象が冷延集合組織の形成に著しい影響を与える原因であることが示された。

冷間圧延によつて、転位が発生し、辻り系の活動や格子欠陥などの発生により内部の組織構造の変化が進むと同時に、蓄積エネルギーが増加することは一般に良く知られている。内部歪エネルギーもその一部であり、焼鈍

のときこのエネルギーの消費によつて結晶粒の成長がおこなわれる。とくに(100)粒の成長には他の結晶方位のものより、多くのエネルギーの供給を必要とすると言われており²⁾、したがつて、内部歪が高い水準にあることが望ましい。また、(100)の核の発生と内部歪の分布とは密接な関係にあり³⁾、高い水準の内部歪の分布は(100)再結晶集合組織の生成を有利に導びく結果となる。

今回は溝ロール圧延によつて生ずる不規則な変形による影響を中心に検討をおこなつたものであり、とくに溝ロール圧延を適用するとき生ずる(1)、加工硬化の現象、(2)、加工硬化と不均一組織との関係、(3)、内部歪の分布について説明することを試みた。すなわち、冷延の段階で溝ロール圧延を適用することによつて生ずる不均一組織の形成により、局部的に加工硬化が著しく進み、それと密接な関係にある内部歪を増加させる点にお

* 昭和51年10月7日受付 (Received Oct. 7, 1976)

** 新日本製鉄(株)製品技術研究所 (Products R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 5-10-1 Fuchinobe Sagamihara 229)

*** 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

**** 新日本製鉄(株)広畑製鉄所 (Hirohata Works, Nippon Steel Corp.)

いて有利に導びかれることになる。本実験はこれらの相関性を明らかにするため、溝ロール圧延による加工硬化の現象、内部歪の分布の状態と変形組織との対応関係について検討をおこなった。とくに、溝ロール圧延後の平滑化圧延の効果、溝ロールの形状と圧下率の影響について検討した。次回に再結晶集合組織におよぼす影響について報告する。

2. 実験方法

2.1 硬度の測定

溝ロール圧延を適用するとき不規則な変形により、著しい加工硬化の現象を生ずるであろう。その程度と分布の状態について硬度を測定することによつて検討した。

2.3×20×150 mm の大きさの3% Si-Fe 合金の熱延板を素材として使用し、(1)、各種溝ロールにより40~80%の範囲の冷延をしたもの、(2)、(1)に対して0.35 mmの板厚まで平滑化圧延を実施したものについて、ピッカース微小硬度計により1000 gの荷重、30sの条件のもとで硬度の測定をおこなった。このときの冷延法は前報の場合と全く同一の方法によつた。

表面硬度の分布は圧延方向とそれと直角の方向に、それぞれ0.4 mmの間隔で測定した結果を示す。また断面に関しては表面から約50 μ離れた点と中心部について硬度を測定した。一部について硬度は5点測定の前平均値で示した。一方、溝ロール圧延による変形後の試料の表面と断面の微細組織の観察をおこなうと同時に、変形組織と硬度の対応を求めた。局所的な不均一変形部の硬度はKnoop圧子を取付けた微小硬度計により、500 gの荷重、30sの条件で測定した。

2.2 残留歪の測定

2 mmピッチの直交溝ロールを使用し、前回と同一の素材と冷延条件によつて得られた試料と比較のため通常の平滑ロール圧延によつた試料について残留歪の測定をおこなった。

残留歪の測定にはいろいろな方法があるが、今回はX線法^{4)~6)}により積分幅と格子歪の関係から弾性歪を求める方法について測定をおこなった。測定はMoK_β特性X線(40kV-200mA)により試料の表面と中心層についておこない、中心層に対してはHF-H₂O₂溶液(100ccのH₂O₂溶液にHFを数滴添加した)により0.16~0.18 mmの板厚まで化学研磨したものをを用いた。

X線照射のスリット幅は、発散スリットは1/6°、検出スリット0.15°、散乱防止スリットは1/6°である。反射強度の測定は歪の影響がよく現われる(222)と(400)面を代表として選び、2θを1/100度、200あるいは

400sの割合でステップ走査した。このチャートの積分幅から $B = \sum (I_i - I_B) / I_P$ を求めた。ただし、このとき I_i は各角度における反射強度、 I_B はバックグラウンドの強度、 I_P はピークの高さである。 I_P としては $I_P = (I_{M+1} + I_{M-1} + 2I_M) / 4$ の関係を採用した。 I_M は反射角のプロフィルの中心における反射強度である。標準試料*の積分幅 b を補正值として使用した。歪の計算法としては弾性歪 ϵ による積分幅の変化量 β は

$$\beta = B - b \\ = 4 \epsilon \tan \theta$$

で与えられる。これから歪量 ϵ は

$$\epsilon = (B - b) / 4 \tan \theta$$

の式から求めることができる。ここで θ はブラッグ角である。

3. 実験結果と考察

3.1 不均一組織と加工硬化の現象

(1) 表面の硬度分布

内部歪の値は特定の走査領域の平均値として得られるのに対して、硬度の測定は局所的な組織変化に対応した加工硬化の現象を容易にとらえることができるので、最初硬度の測定を進めた。溝ロール圧延のみを実施した場合には、得られる平均硬度の水準は通常の平滑ロール圧延の場合とあまり変わらず、溝の形状による影響は明確に現われなかつた。溝ロール圧延の特徴は不均一組織の形成にあるとすれば、硬度の平均的な意味よりも、その分布の仕方に意味があるので、次に表面の硬度分布を測定した。

Fig. 1は溝ロール圧延のみおこなったときの試料の表面について、圧延方向とそれと直角の方向に400 μの間隔で硬度を測定した結果を示す。図中の(1)と(2)は縦溝ロールを使用したときの結果で、図中に示すように3パスのときに溝の配列の方向にしたがう硬度の分布が見られるが、10パスのときにはむしろランダムに近くなる。また、図中の(3)と(4)は直交溝ロール圧延による結果で、圧延方向とそれと直角方向に対する表面硬度の分布を示す。いずれの場合も7パス後には溝の配列に対応した硬度の分布は認め難い。すなわち、溝ロール圧延の数パス後には溝に相当する部分が接近したり重なる機会が多くなり、前報で示したように変形の相互作用の結果、複雑な組織を形成し、硬度もそれに対応してランダムな分布を示すものと考えられる。

* 標準試料としては平滑ロールで85%の冷延したものについて、850°C×10hの水素焼鈍をおこない冷却したものを使用した。

1,000g 30sec

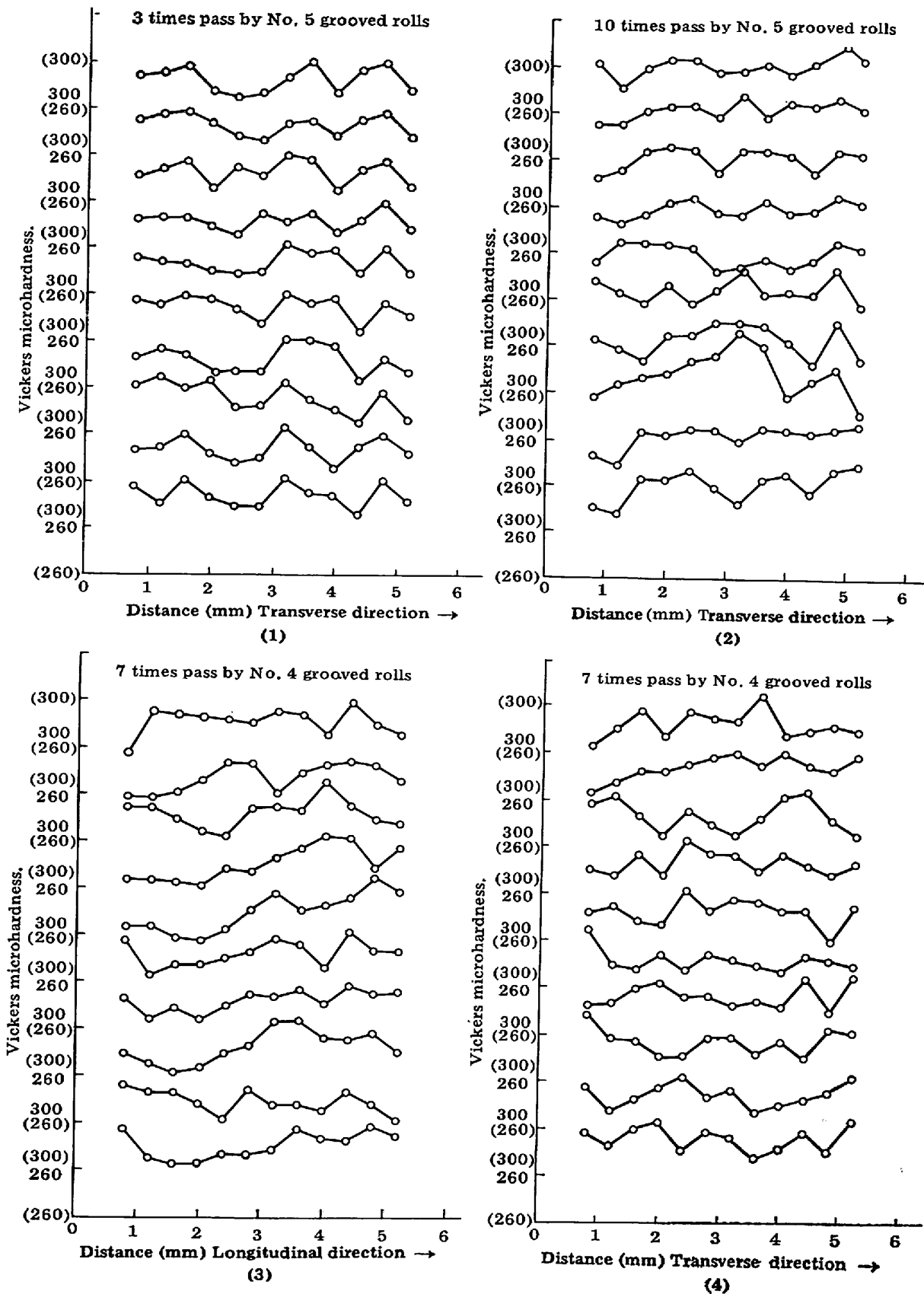


Fig. 1. Hardness distribution curves on the surface of specimens cold rolled by grooved rolls.

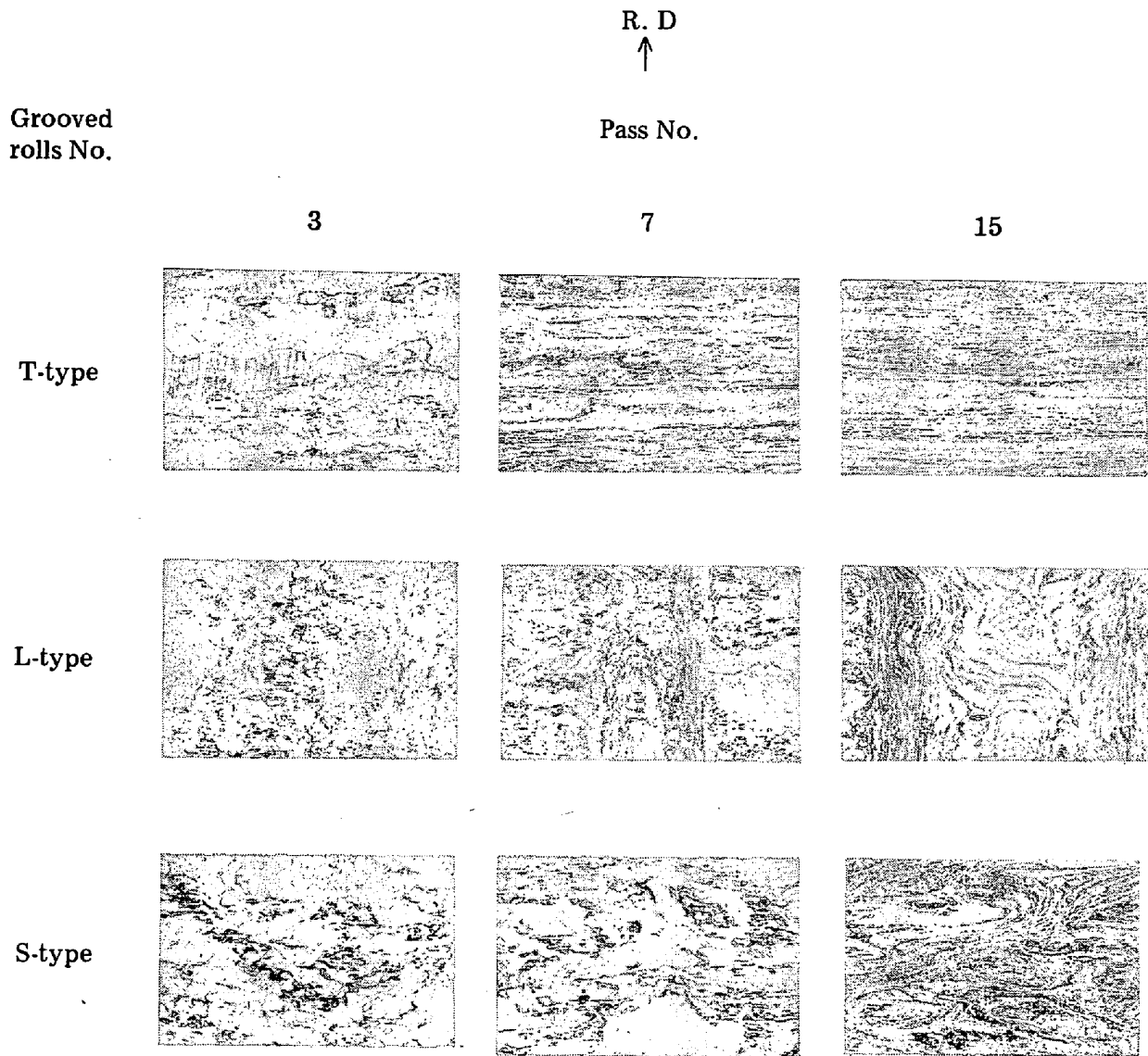


Photo. 1. Microstructures on the surface of specimen cold rolled by grooved rolls.

× 50

Photo. 1 は上と同じ条件で冷延した試料の表面組織を観察した結果を示す。数パス後には溝の配列にあまり関係なく乱れた組織を形成し、上述の硬度の分布と良い対応関係にあることがわかる。すなわち、この場合、組織は数パスまで溝の配列にしたがうように現われるが、これ以上では完全に乱れた組織となり、溝の配列に規制される硬度でなく、組織に規制されるようになる。これが溝ロール圧延の著しい特徴と言える。

また、組織について注目すべきことは、パス数 15 回の結果であり、パス回数が多くなると渦状に流れた組織が表面に見られることであり、とくに直交溝ロールと縦溝ロールを使用するとき顕著に現われる。これは前述したところの 3 次元的な材料の流れに起因すると考えられ

る。当然、このような流れは板面に垂直な軸のまわりに、結晶の回転を導くように作用するものと考えられる。

一方、このような溝ロール圧延後、引続き平滑化圧延によつて、表面の平均的な硬度が著しく上昇するのが認められた。この場合にも表面では依然として乱れた組織を示す。このように、表面の組織と対応して硬度の分布がランダムになるのは溝による影響部の相互作用にもとづくためである。

(2) 断面の硬度分布

溝ロール圧延を適用したとき、表面に関すると同じように断面についても容易に不規則変形の影響が現われることが容易に推定される。これを確認するため、まず標

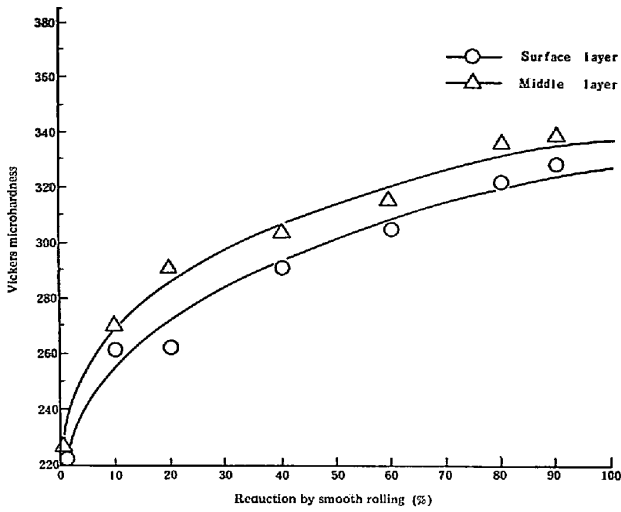


Fig. 2. Vickers microhardness on transverse section vs. the reduction of smooth rolling.

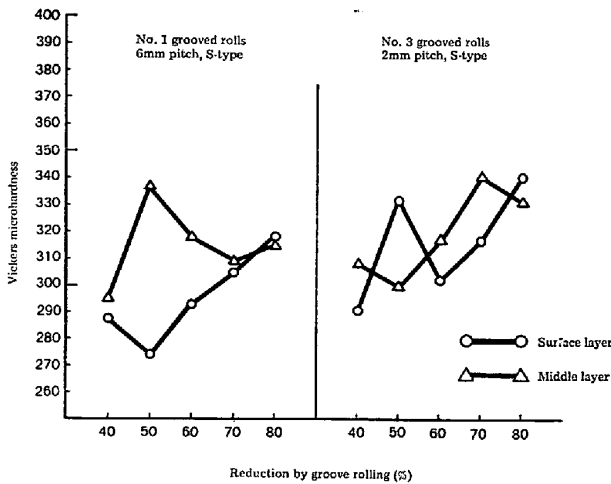


Fig. 3. Effect of rolling reduction by grooved rolls on Vickers microhardness.

準となる平滑ロールにより圧延した場合の断面の硬度分布を測定した。その結果を Fig. 2 に示す。図に示すように、表面層より中心層の硬度が Hv で約 10 程度高く現われるが、測定値のバラツキが少なく、比較的均一な変形と考えられる。中心層の硬度が高いのは成分や不純物の偏析による影響と考えられる。

Fig. 3 は 6 mm と 2 mm ピッチの直交溝ロールにより圧延を行つたときに得られる断面の硬度の測定値と圧下率との関係を示す。図に示すように、前者の場合は得られる硬度の水準は全般に低く、約 50% の圧下率のとき測定値の差が大きく、表面層と中心層では Hv で約 60 程度の差を生じた。これは溝ロール圧延による不均一組織の形成に起因していると考えられる。約 80% の高圧下率の圧延では表面と中心層の差の程度は少ない。そして得られる高圧下率の硬度値は Fig. 2 に示す

平滑ロール圧延の場合よりむしろ低目である。同時に図中に 2 mm ピッチの直交溝ロールの結果を示すが、前者の場合より硬度が若干高目に現われる程度であり大きい差は認められない。そして約 80% の圧下率のとき Hv=340 程度の値となる。以上に示したように、溝ロール圧延によつて、表面におけると同じように断面についても不規則変形の影響が現われるが、しかしその割合には硬度の平均的な値に対する影響は少なかった。

Fig. 4 は加工硬化に対する 6 mm ピッチの溝ロール圧延後の平滑化圧延による影響を示す。図に示すように、このとき平滑化圧延によつて中心層の硬度が若干上昇する程度で、全体的に見た場合、加工硬化に対する影響は少ないと言える。これに対して、Fig. 5 に示すように、2 mm ピッチのものを使用するときには、平滑化圧延による硬度の上昇は顕著であり、約 40% の溝ロール圧延後、平滑化圧延により、中心層では Hv=350、

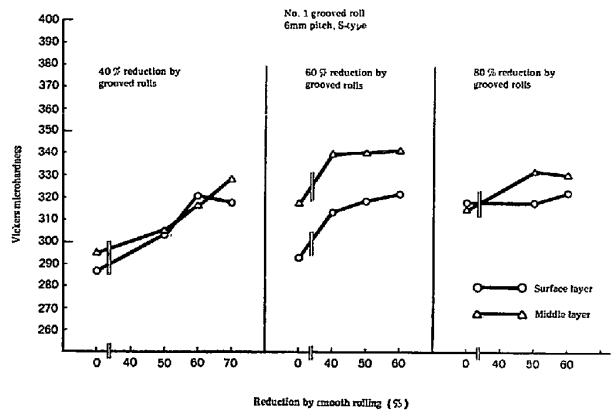


Fig. 4. Effect of rolling reduction by smooth rolls for the specimens cold rolled by S-type grooved rolls of 6mm pitch on Vickers microhardness.

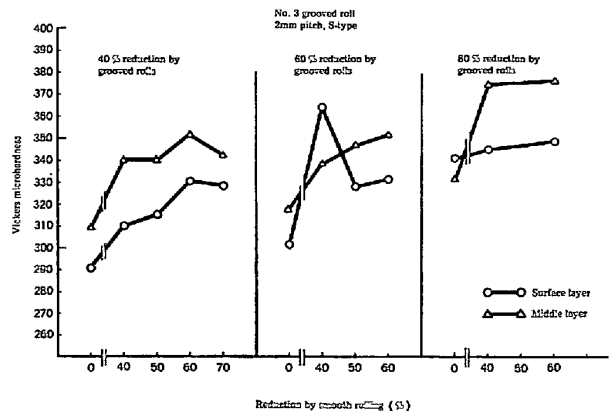


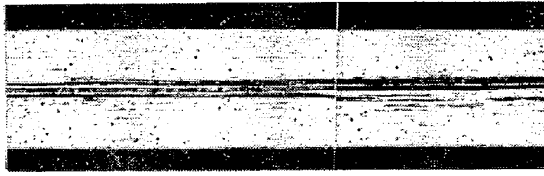
Fig. 5. Effect of rolling reduction by smooth rolls for the specimens cold rolled by S-type grooved rolls of 2mm pitch on Vickers microhardness.

Grooved rolls

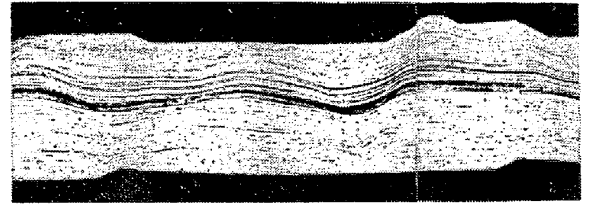
Longitudinal section

Transverse section

L-type



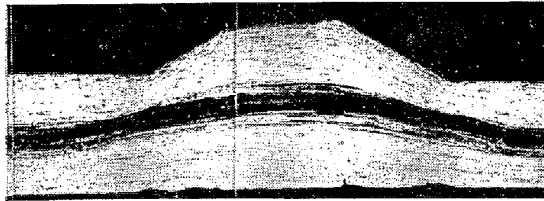
(1)



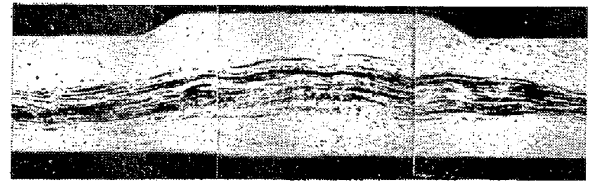
(2)

X 30

S-type



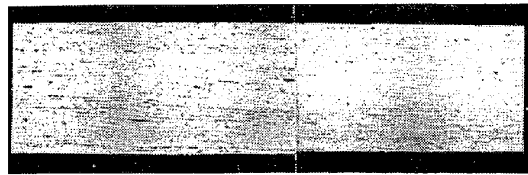
(3)



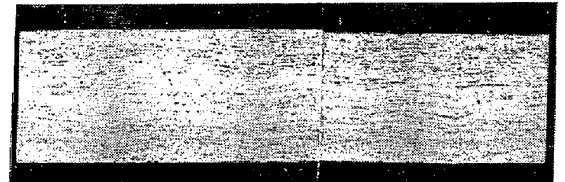
(4)

X 30

S-type



(5)



(6)

X 50

Photo. 2. Microstructures on the sections of specimens cold rolled by 70% reduction of grooved rolls.

表面層では $Hv=330$ の硬度値を示しその差は極めて大きい。さらに圧下率の上昇に伴い硬度は増加を示し、約80%の溝ロール圧延のとき、その後の平滑化圧延によって、平均硬度は $Hv=360$ の前後、中心層では $Hv=380$ の最高の硬度値を示した。この場合も表面層と中心層の硬度差は極めて大きい。これは溝ロール圧延法の一つの特徴である。この値は通常の冷延法によつては容易に到達できない。すなわち、小さいピッチの溝ロールを使用するとき平滑化圧延の効果が顕著となる。

Photo. 2 は縦溝ロール(L)と直交溝ロール(S)により圧延を行つたとき、方向に依存する断面組織を示す。これから圧延方向断面では比較的均一な組織の流れとなつてはいるが、これと直角方向の断面では不均一な組織が形成されているのが見られる。また、写真の(5)と(6)に示すように溝ロール圧延後に平滑化圧延を実施した場合にもこの傾向は変わらない。

溝ロールの形状により異なる材料の流れを生ずることは前報のプラスチックの模型による実験で示した。いま、横溝ロールにより形成された突起部を平滑化すると

きの流れについて考えて見ると、それが地の流れの方向と一致しているため、変形組織は圧延方向に伸びた形となり局部的な歪の発生を留めない。これに対して、縦溝ロールにより形成された突起部を平滑化するときの材料の流れは、地の流れの方向と直角方向に生ずるため不均一組織はそのまま留まることができる。硬度もこのような組織に依存することが考えられるので、次に硬度の方向依存性について検討した。

Fig. 6 はNo. 4 の直交溝ロールにより圧延した場合、引続き 0.35 mm の板厚まで平滑化圧延を行つた場合の両方について、圧延方向とそれと直角方向の平均硬度の測定結果を示す。図中の曲線の(1)と(2)は溝ロール圧延のみの結果で、そのとき高圧下率の圧延によつて得られる硬度の平均的な値は $Hv=310$ 程度である。曲線の(3)と(4)は、前と同一条件の溝ロール圧延後、平滑化圧延を実施したときの結果で、このとき前回より著しい硬度の上昇が認められた。そして平均的な硬度は $Hv=350$ 程度である。このいずれの場合も、圧延方向の断面よりそれと直角方向の断面の硬度の水準

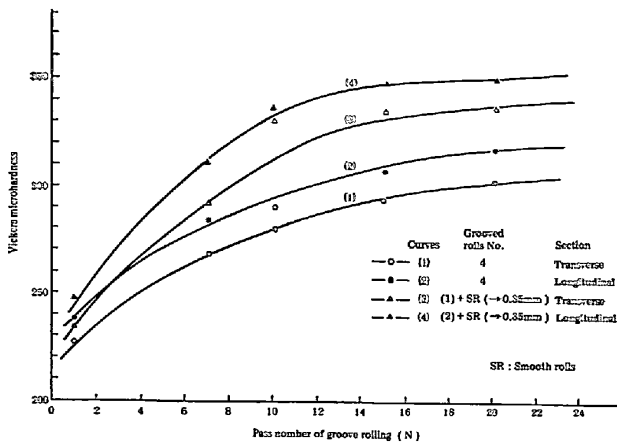
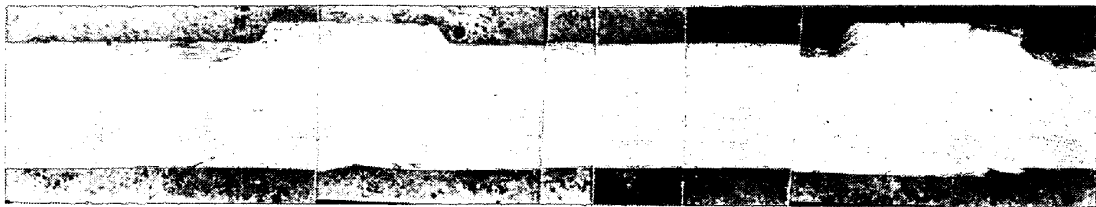


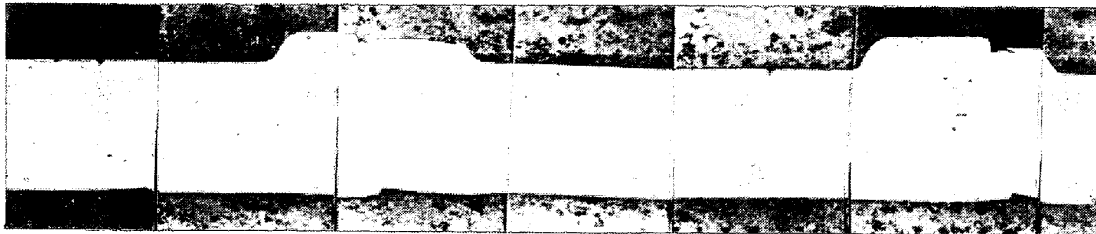
Fig. 6. Vickers microhardness depending on the direction of hardness measuring. Curves (1) and (3) on parallel section, and curves (2) and (4) on cross section to rolling direction.

は高い。すなわち、この結果は前回の Photo. 2 の組織の変化と良い対応を示している。このように硬度は材料の流れの違いによる組織的变化に規制されたように現われるが、ある範囲における硬度の平均的な値は方向に依存することは考えられない。今回の結果は特定な面に限定したのでこのような方向による差を生じたものと考えられる。

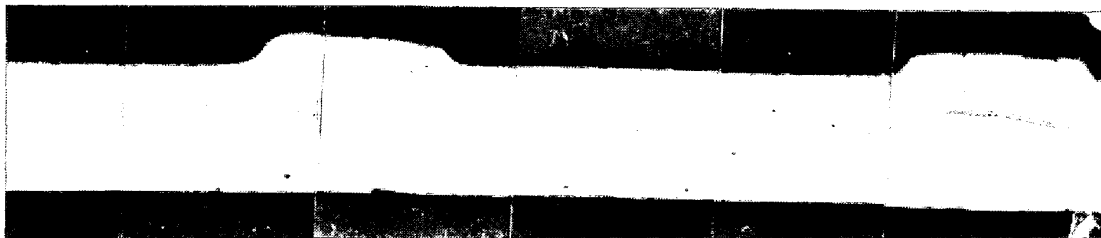
Photo. 3 の (1)、(2) と (3) は縦溝ロールにより 70% の圧下率で圧延した冷延材に対して、圧延方向にそれぞれ 1.5 mm 間隔で観察した幅方向の断面組織である。これら 3 枚の写真について詳細に観察を行うとき幅方向のみならず圧延方向に対しても組織的不均一性が行われていることがわかる。すなわち、溝ロール圧延がある程度進んだ段階では、容易に立体的にランダムな組織が形成される。これが溝ロール圧延の一つの特徴と



(1)



(2)



(3)

X 30

Photo. 3. Change in microstructure for rolling direction of specimens cold rolled by 70% reduction of L-type grooved rolls. Photos. (2) and (3) show the microstructure of surface eliminated about 1.5 and 3.0 mm on the section of (1) respectively.

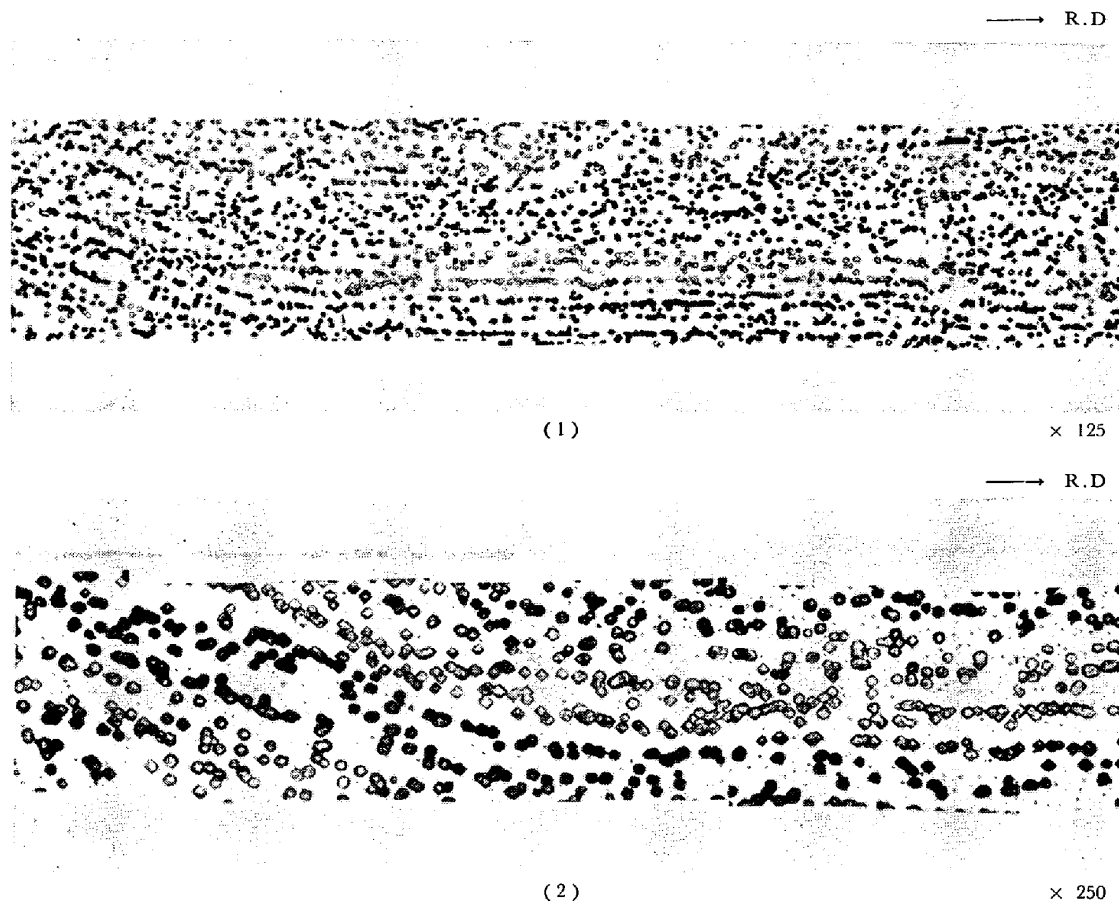


Photo. 4. Band structures of (100) [011] oriented grains parallel to shear bands in produced by cold rolling of L-type grooved rolls.

Table 1. Values of residual strain obtained.

Specimens No. Reduction (%)		$\epsilon_{(222)}$			$\epsilon_{(400)}$			$\epsilon_{(400)}/\epsilon_{(222)}$
		ϵ	ϵ/ϵ_{SR-1}	$\epsilon_{Middle}/\epsilon_{Surface}$	ϵ	ϵ/ϵ_{SR-1}	$\epsilon_{Middle}/\epsilon_{Surface}$	
SR-1 GR-0% SR-86	Surface	0.96	1.00	1.38	1.91	1.00	1.06	1.99
	Middle	1.32	1.00		2.02	1.00		1.53
GR-1 GR-75 SR-75	Surface	1.30	1.35	1.22	2.51	1.31	1.07	1.93
	Middle	1.58	1.20		2.69	1.33		1.70
GR-2 GR-60 SR-62	Surface	1.35	1.41	1.60	2.73	1.43	1.18	2.02
	Middle	2.16	1.64		3.21	1.59		1.49
GR-3 GR-70 SR-49	Surface	1.30	1.35	1.32	2.71	1.41	0.90	2.08
	Middle	1.72	1.30		2.43	1.20		1.41

GR : grooved roll
SR : smooth roll

言える。

溝により形成される山型の突起が平滑化されるとき、地の中に楔を打込んだようないわゆる “Wedging action” の現象を生ずるのであろう。そのとき地との境界において写真の (1) の左側に見られるような剪断変形を生じ、局部的に不均一組織が形成される。このような変形帯に対して、Knoop 圧子を取り付けた微小硬度計により 500 g, 300s の条件で硬度を測定するとき、 $H_v = 314$ の平均値を示した。これ以外の部分の平均硬度は $H_v = 277$ であることから、変形帯の硬度は著しく上昇していることは明らかであり、結果的には平均的な硬度の上昇の原因になっている。

Photo. 4 はこのような剪断帯に平行に形成される (100) [011] 方位の帯状構造を示す。したがって、剪断帯の形成は (100) 冷延集合組織の発達と密接な関係にあることがわかる。

溝ロール圧延後には鋼板の表面に完全に平滑化されない多数の突起が残っており、このような状態では硬度は高い水準に達しない。すなわち、後段で平滑化圧延を実施するとき、前述したように “Wedging action” の現象により、著しい加工硬化をまねく、このとき、溝により形成された突起部の変形量が重要であることがわかる。しかし、この場合量的な問題よりも、材料の流れに關係するいわゆる有効変形量であることを意味している。

溝ロール圧延の初期の段階では、変形は主に表面層の近傍で行われるが、冷延が進むにしたがい溝の影響が次第に中心層におよぶ、とくに、後段で平滑化圧延を実施するときには、上述の効果がいつそう活発になり多くの不均一組織が形成される。一方、減厚の効果が、中心層に両面から圧縮応力を加えることになり中心硬度が著しく上昇する。すなわち、この場合には Photo. 2 の (5) (6) に示すように、中心部に不均一組織が見られる。成品の形状は見掛上通常の冷延法による場合となら変わらないが、内部では加工硬化と内部歪は高い水準にある。

3.2 残留歪の分布

Table 1 は 2 mm ピッチの直交溝ロールにより、それぞれ 40, 60, 70% の冷延後、引続き 0.35 mm の板厚まで平滑化圧延を実施した冷延材に対して、圧延面に平行な (222) と (400) 面から得られる歪量の測定結果である。Fig. 7 の (1) にこれを図によつて示した。また、同図の (2) に同一冷延条件における硬度の測定結果を比較のために示した。これから両者の変化は良好な対応関係にあることがわかる。すなわち、硬度の測定結果と同様に、溝ロール圧延の圧下率の上昇とともに約

70%の圧下率まで残留歪の上昇が認められる。とくに、中心部の値は表面層より高く現われる。しかし、圧下率を 80% まで上げるとき、歪の値は若干低下する傾向が見られる。硬度の測定にも同じ変化が見られるがその理由は明らかでない。(400) 面に対する歪量は (222) 面のそれより高く現われ、中心層と表面層との歪量の差は (222) 面に対する方が大きい。

通常の平滑ロールによる冷延により、約 70% の圧下率のとき、蓄積エネルギー (V) は $V_{110} > V_{111} > V_{100}$ の関係にあり、また90%の圧下率では $V_{411} > V_{111} > V_{100}$

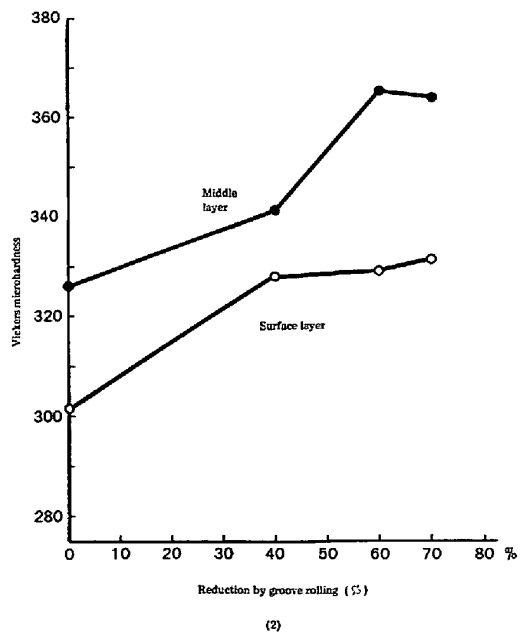
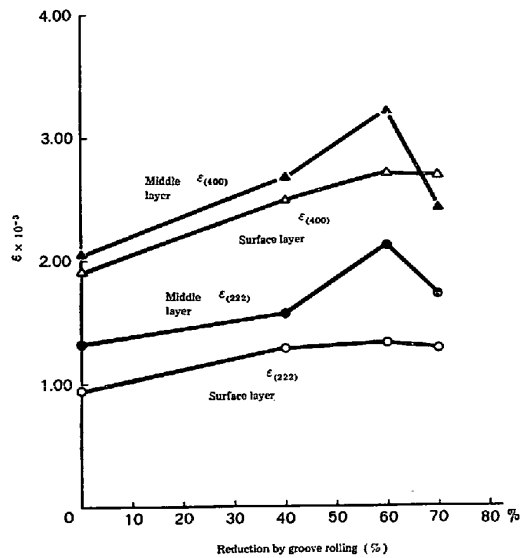


Fig. 7. Effect of rolling reduction by grooved rolls on the formation of residual strain in polycrystalline specimens reduced to 0.35 mm thick by succeeding groove rolling and smooth rolling.

の関係にある。焼鈍によつて、この蓄積エネルギーの高い順序で優先的に粒成長がおこなわれる。これに対し、溝ロール圧延法を適用するとき、 $V_{100} > V_{111}$ の関係にあることが、本実験で示された。これはとりも直さず、溝ロール圧延によつて成形された(100)冷延集合組織は高い歪エネルギーの状態にあり、焼鈍によつて(100)組織が有利に導かれることを意味している。

以上の結果を要約すると溝ロール圧延を適用することによつて、(1)、回転を伴う材料の流れの現象によつて、(100)冷延集合組織が優位に導びかれる。(2)、不規則な変形による材料の流れの現象は著しい加工効果と高い水準の残留歪を形成し、焼鈍のとき、(100)核の発生と粒成長を有利に導びくことができる、このような効果は従来の冷延法によつては到底得ることができないものであり、溝ロール圧延法の著しい特徴と言える。

4. 結 言

冷延の段階で溝ロール圧延と引続き平滑化圧延をおこなうとき、形成される不均一組織の観察、加工硬化の現象、残留歪の分布について検討をおこなつた。そのとき得られた結果を以下に示す。

(1) 溝ロール圧延を行うとき数パス後に乱れた表面組織を形成する。硬度の測定結果もそれと対応してランダムな分布を示す。断面に関しても同じような現象が認められた。

(2) 圧延方向より幅方向の断面に乱れた組織が認められる。硬度もこの組織に対応して圧延方向より幅方向の断面で高く現われる。

(3) 溝ロール圧延後の平滑化圧延により著しい硬度の上昇が認められる。これは通常の圧延法では容易に到達できない値であり、溝により形成される突起を平滑化するとき、“Wedging action”の現象が生ずるための効

果と考えられる。

(4) 溝ロール圧延と引続き平滑化圧延を実施したものは、通常の平滑ロール圧延のものより冷延後に残留する歪の平均値は大きい(約1.3~1.5倍)。

(5) 圧延面に平行な結晶面指数により歪の受ける量は異なり、一般に(400)面が(222)面より残留する歪量は大きい。

(6) 中心層の歪量は表面層より大きく、その差は(400)面に対するより(222)面に対する方が大きい。

以上に示すように、冷延の段階で溝ロール圧延法を適用するとき、不規則な変形により、著しい加工硬化の現象と高い水準の内部歪が形成されることが示された。この程度の歪の水準は初期の目的に対して、十分満足できるものであるかどうかは、焼鈍をおこなつてそのものの磁性を測定しなければわからない。しかし、平滑ロールによる圧延に対する結果と比較するなら、いちおう、初期の目的とする値に近い値が得られるものと考えられる。

終りに終始ご懇切なご指導をいただいた当社製品技術研究所上野副所長に深甚な謝意を表する。

文 献

- 1) 熊沢増治, 中川恭弘, 関根知雄: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1828
- 2) J. L. WALTER and E. F. KOCH: Acta Met., 11 (1963) 8 p. 923
- 3) J. L. WALTER and C. G. DUNN: Trans. Met. Soc. AIME 218 (1960) 10, p. 914
- 4) 仁田 勇: X線結晶学 上, 下 丸善, 1959
- 5) C. S. BARRETT and MASSALSKI: Structure of Metals., 3rd ed. Mac Graw-Hill New York (1966)
- 6) F. B. L. SCHOENING: Acta Cryst., 18 (1965), p. 905