

温間潤滑圧延による高 r 値熱延鋼板の開発

橋本俊一(工博)*・塚谷一郎(工博)**・鹿島高弘**・三好鉄二**

*鉄鋼事業本部・生産技術部 **加古川製鉄所・技術研究センター

Development of Hot-rolled Steel Sheet with a High r-value by Rolling in Ferrite Region with Lubrication

Dr. Shun-ichi Hashimoto・Dr. Ichiro Tsukatani・Takahiro Kashima・Tetsuji Miyoshi

The effects of metallurgical factors on the r-value and texture of hot-rolled ultra low carbon steel sheet were studied. The following requirements should be fulfilled to obtain hot-rolled steel sheets with good deep drawability: 1) good lubrication was applied to eliminate non-homogenous texture formation in the thickness direction. 2) solute carbon was minimized during hot-rolling in the non-crystallization ferrite region. A high r-value of about 1.5 was obtained by hot-rolling with good lubrication conditions (forward slip below 5%) which was achieved by applying a lubricant of 1% synthetic ester emulsion in the laboratory.

まえがき = 高付加価値製品である薄鋼板、とくに、冷延鋼板は鉄鋼材料全体の中でも重要な戦略製品であるにもかかわらず、製造プロセスが長く複雑であり、その簡略化、省略化が不可欠である。いっぽう、熱延鋼板はプレス成形用鋼板として必須な特性である r 値が 1.0 以下と低く、冷延鋼板の代替として使用できないのが実状である。冷延鋼板に代替しうる熱延鋼板を製造するためには、冷延 - 焼鈍工程でおこなわれる集合組織制御を熱延工程で代用する必要がある。一つの解決策として、フェライト()未再結晶域で温間圧延することにより冷間圧延と同質の加工集合組織をえた後、巻取やポスト焼鈍工程で再結晶させる方法が考えられるが、期待する r 値がえられていない¹⁾。これらは温間圧延時、ロールと鋼板表面間の摩擦係数が高いため鋼板表層部にせん断集合組織が形成されることに起因する²⁾³⁾。

しかしながら、近年、潤滑を施すことにより鋼板表層部でのせん断集合組織の形成を抑制できること⁴⁾が明らかになって以来、域圧延により高 r 値を有する熱延鋼板をえるための検討が数多くなされている^{5)~9)}。

いっぽう、日本鉄鋼協会創形創質工学部会板箔フォーラムの加工用薄鋼板エコプロセス研究会において、これらを一歩進めた“薄スラブキャスティング - 域潤滑圧延 - 焼鈍プロセス”が 21 世紀の薄板製造プロセスの一つとして提言され¹⁰⁾、さらに、これらを実現するための潤滑技術動向に関するシンポジウム¹¹⁾が開催されて活発な議論がなされるなど、今後注目すべき技術である。

このような状況のもとで、冷延工程を省略できるプロ

セスである温間潤滑圧延 - 焼鈍プロセスを念頭において、高 r 値熱延鋼板をえるため潤滑特性の影響を実験室で検討したので、その結果^{5)~9),12)}を報告する。

1. 実験方法

1.1 供試材の化学成分

本実験にもちいた供試材の化学組織を第 1 表に示す。これらは 90kg の真空溶解鋼であり、約 40ppmC の極低碳素鋼である。鋼 B は Ti や Nb を添加しない鋼であり、鋼 B 以外の鋼は侵入型固溶元素の C や N を固着するに十分な量の Ti や Nb を単独、もしくは複合で添加した interstitial-free (IF) 鋼である。

1.2 熱延条件

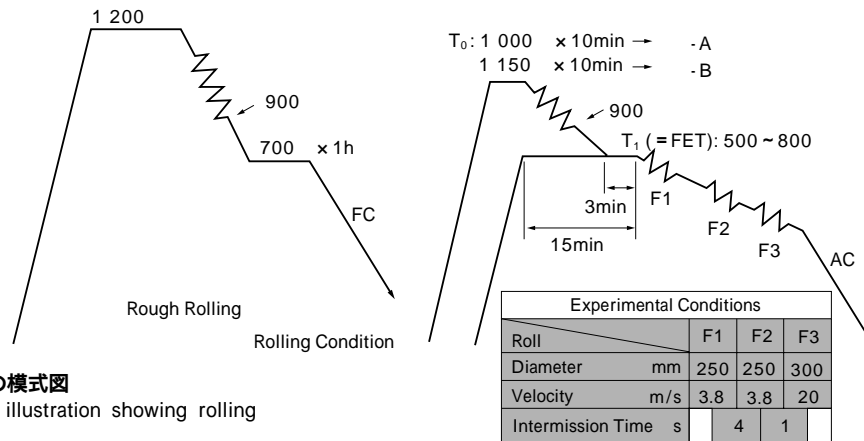
1.2.1 温間圧延時の牛脂潤滑の効果

実験には第 1 表に示す鋼 A~E をもちい、第 1 図に示す 2 種類の圧延条件でおこなった。まず、素材を 1200 に加熱し、仕上温度 900 で熱間圧延した後、700 に 1h 保持後、炉冷した。圧延後の熱処理は鋼中の C, N を炭窒化物として析出させるためである。

次いで、実験用の 2 スタンド高速圧延機をもちい、圧延条件 では板厚 4.5mm の供試材を 500 から 800 に加熱し、これを入側温度(T_1)として 3 パス、合計圧下率 73% で 域圧延をおこなった。1, 2 および 3 パス後の狙い板厚は、それぞれ 3.0, 2.0 および 1.2mm である。粒度、析出物、固溶炭素量などの条件をできるだけそろえて r 値に及ぼす圧延温度の影響を純粹に抽出するため、加熱時間を必要最小限の 15min とした。1 パス目(F1)

第 1 表 供試材の化学成分
Table 1 Chemical compositions of steels

Steel	mass %								
	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	Nb	N
A	0.0035	0.02	0.12	0.001	0.0084	0.030	0.11	—	0.0035
B	0.0047	0.01	0.09	0.003	0.0021	0.036	—	—	0.0029
C	0.0032	0.02	0.10	0.002	0.0012	0.029	0.11	—	0.0020
D	0.0045	0.01	0.21	0.015	0.0059	0.041	—	0.06	0.0037
E	0.0035	0.02	0.11	0.002	0.0011	0.019	0.04	0.04	0.0018
F	0.0032	0.01	0.19	0.017	0.0039	0.031	0.05	—	0.0032
G	0.0040	0.02	0.17	0.011	0.0033	0.012	0.10	—	0.0031



第1図 実験手順の模式図
Fig. 1 Schematic illustration showing rolling condition

および2パス目(F2)の圧延は直径250mmのロールで圧延速度3.75m/sでおこない、3パス目(F3)は直径300mmのロールで圧延速度20m/sでおこなった。F1~F2およびF2~F3パス間の時間は、それぞれ約4sおよび1sである。また、板厚方向の塑性歪みを均一にするためロール表面に牛脂を塗布した(潤滑圧延)。

圧延条件では板厚10mmの供試材を1000(A)もしくは1150(B)に加熱して炭化物を一部固溶させ、その後、オーステナイト(γ)域で55%の熱間圧延をおこなった後、γ域圧延の入側温度まで空冷し、その温度に3min保持した。これらはr値に及ぼす固溶炭素の影響を抽出するためである。その後、圧延条件と同じ仕上げ圧延をおこなった。

さらに、これらの材料を酸洗後、750℃×3hの再結晶焼鈍を施した後、r値およびX線により板厚各層の集合組織などを測定した。r値は圧延方向L、圧延45°方向Dおよび圧延直角方向Tから厚さ×幅10×長さ120mmの短冊型試験片を採取し、15%の引張を与えた時の板厚・板幅歪みより測定し、次式によりr̄値を求めた。

$$\bar{r} = (r_L + 2r_D + r_T) / 4 \dots\dots\dots (1)$$

1.2.2 合成エステル系エマルジョンによる潤滑性能の影響

上記の実験では熱間圧延時の潤滑は牛脂をロールに塗布するという理想的な状態でおこなったが、実際の熱間圧延ミルでは潤滑油は圧延油としてノズルなどでロール表面に供給されるのが一般的である。このため潤滑状態が大幅に異なってくると推定される。そこで、これらをシミュレートする実験をおこなった。

第1表に示す化学組成を有する板厚7mmの極低炭素Ti添加鋼(鋼F)を800℃×20min加熱・保持後、実験用の2スタンド高速圧延機をもちい、1.2.1項の圧延条件と同じ条件で圧延した(ただし、入側温度700℃。1.2および3パス後の狙い板厚は、それぞれ4.5、3.0および1.8mmである)。

潤滑性能は潤滑剤の種類に依存し、一般的にロール附着性は粘度に、また、耐熱性はケン化価に依存する。そこで、第2表に示すように実験室的に粘度およびケン化価を変えた種々の合成エステル系潤滑剤を準備した。これらの体積率1%のエマルジョン状態とし、約0.4MPa

第2表 実験にもちいた潤滑剤の一般的性能
Table 2 Feature of lubricants used in this experiment

	Properties		Remarks
	Viscosity	Saponification Value	
Lub.(a)	73	63	(Mineral Oil Type)
Lub.(b)	44	185	—
Lub.(c)	109	176	—
Lub.(d)	351	188	—
Lub.(e)	(100)	178	+10% Graphite
Lub.(f)	65	183	(Tallow Type)

Viscosity: mm²/s at 37.8

水圧のポンプにて圧延機の入側よりノズルで直接ロール表面に散布した。散布する前のロールはすべて脱脂し、表面は乾燥状態とした。これらの潤滑性能の評価は先進率でおこなった。先進率はロール表面にポンチで圧痕をつけ、圧延後の供試材に転写された圧痕間隔の伸び率である。すなわち、ロールのポンチ圧痕間隔をl₀、圧延した供試材に転写された圧痕間隔をl₁とすると先進率FSは式(2)で与えられ、圧下率が一定の場合、潤滑性能が良好なほど先進率は小さくなる。

$$FS = (l_1 - l_0) / l_0 \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

次いで、850℃×1.5min焼鈍後にr値などを測定した。

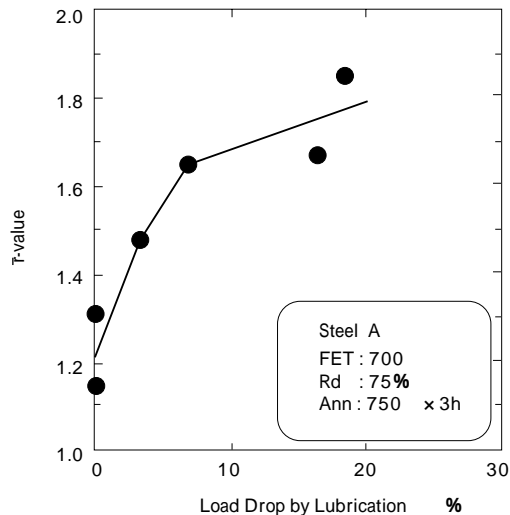
1.2.3 亜急冷凝固 - 熱間圧延時の牛脂潤滑の効果

ストリップキャストの凝固状態をシミュレートするため第1表に示す極低炭素Ti添加鋼(鋼G)を高周波真空溶解炉にて溶製し、10mm間隔に設置した金型間に鑄込んだ。金型の厚さは45mm、えられた薄鋼板のサイズは厚さ10×幅100×高さ120mmである。引き続き、約10/sの冷却速度で600℃もしくは室温(T₀)まで冷却し、さらに750℃もしくは950℃(T₁)に再加熱し、いずれも入側温度750℃で、2パスにて全圧下率80%の圧延を牛脂による高潤滑条件下でおこなった。1および2パス後の狙い板厚は、それぞれ5.0および2.0mmである。その後、850℃×1.5min焼鈍をおこない、引張試験などに供した。

2. 実験結果および考察

2.1 熱間圧延時の牛脂潤滑の効果

鋼Aをもちい、ロール表面に塗布する牛脂の量を変化させて加熱・圧延入側温度700℃で圧延した。潤滑効果の評価は無潤滑圧延からの圧延荷重の低下比率でおこな



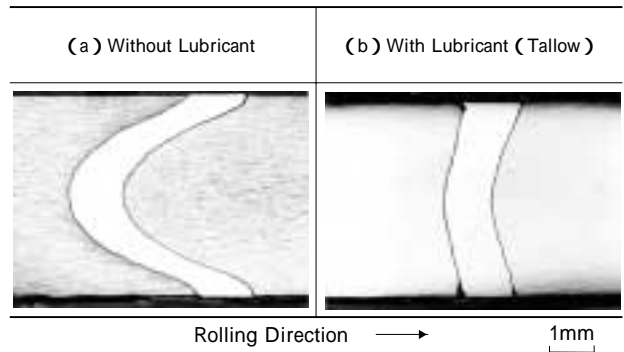
第2図 \bar{r} 値に及ぼす潤滑条件の影響
Fig. 2 Effect of lubrication condition on \bar{r} -value

った。結果を第2図に示す。無潤滑圧延での \bar{r} 値は1.3であったが、圧延荷重の低下、すなわち、高潤滑圧延ほど高い \bar{r} 値を示し、約20%の圧延荷重が低下した高潤滑材では1.85の \bar{r} 値を示した。

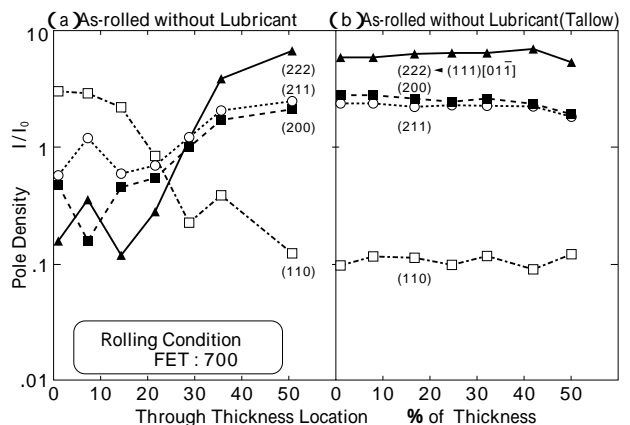
圧延時の潤滑の効果はロールと鋼板表面の摩擦係数の低下にともない鋼板表面層部における変形状態が変化した結果、すなわち、せん断変形領域が減少した結果と考えられる。その状態を可視的に捉えるためステンレス線を板厚方向に埋め込んだ素材を1パスで圧下率40%の圧延をおこない、圧延方向断面の組織を観察した。その結果を第3図に示す。無潤滑圧延材ではステンレス線が大きく曲げられており、大きいせん断変形を受けたことがわかる。これに対して、潤滑圧延材ではほぼ直線であり、せん断変形領域が小さくなっている。

域圧延時の潤滑条件の相違による r 値の変化はせん断変形状態の相違にともなう板厚方向の集合組織の変化に起因する。第4図(a)に無潤滑圧延ま材の板厚方向における極密度変化を示す。(110)面極密度は表層部できわめて高く、板厚中心部に向かって減少し(222)、(211)および(200)面極密度は逆に表層部で低く、板厚中心部に向かって増加する。いっぽう、第4図(b)に示すように潤滑圧延ま材では板厚方向の極密度変化がほとんどなく、均一な分布を示している。

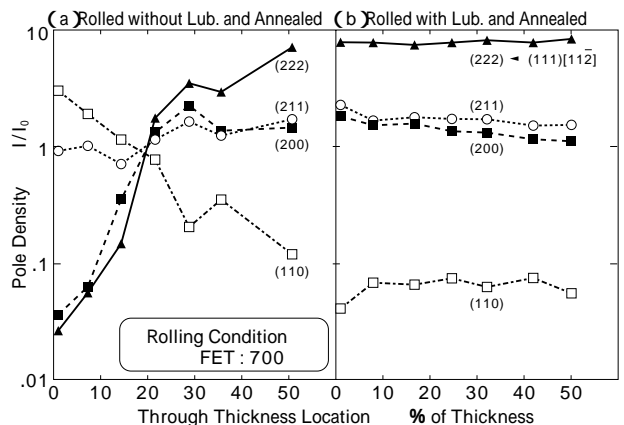
第5図(a)(b)に再結晶焼鈍後の極密度変化を示す。圧延ま材の板厚方向の変化と同様の傾向を示し、無潤滑圧延材では r 値向上に寄与する(222)面極密度が表層部できわめて低く、板厚中心部のみが潤滑圧延材と同等の値を示す。鋼板の r 値は板厚方向各層の r 値(集合組織)の積算であり、無潤滑圧延材において低い r 値しかえられない理由はここにある。潤滑圧延材では板厚方向全域にわたって高い(222)面極密度を示す。参考までに、第6図に板厚中心部の(200)極点図を示す。第6図(a)に示すように圧延までは冷延集合組織と同質の(211)[01 $\bar{1}$]を主方位とするRD//<011>繊維集合組織が発達していることがわかる。いっぽう、焼鈍を施すと第6図(b)に示すようにIF鋼の典型的な再結晶集合組織である



第3図 板厚方向に埋め込んだステンレスワイヤの温間圧延後の変形状況
Fig. 3 Flexion of inserted stainless wire after hot-rolling
Rolling velocity : 0.3m/s
Rolling diameter : 300mm
Reduction of hot-rolling : 40%(10 → 6mm)



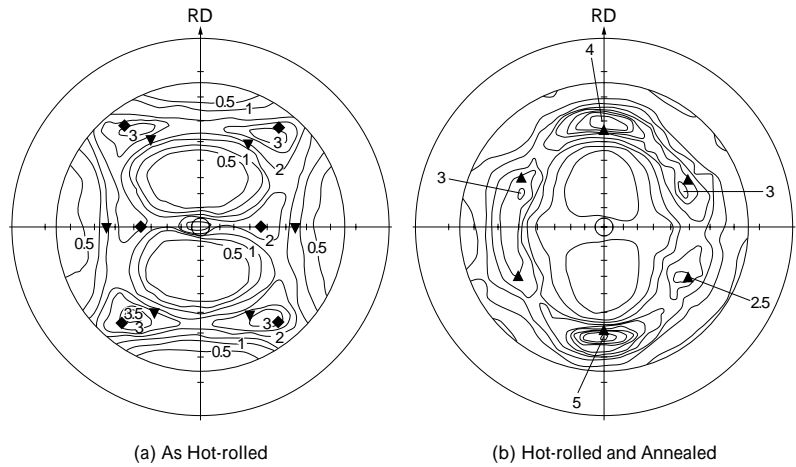
第4図 鋼Aの温間圧延ま材の板厚方向における極密度変化に及ぼす潤滑の影響
Fig. 4 Effect of lubrication (tallow) on the changes in pole density through thickness location in hot-rolled steel A



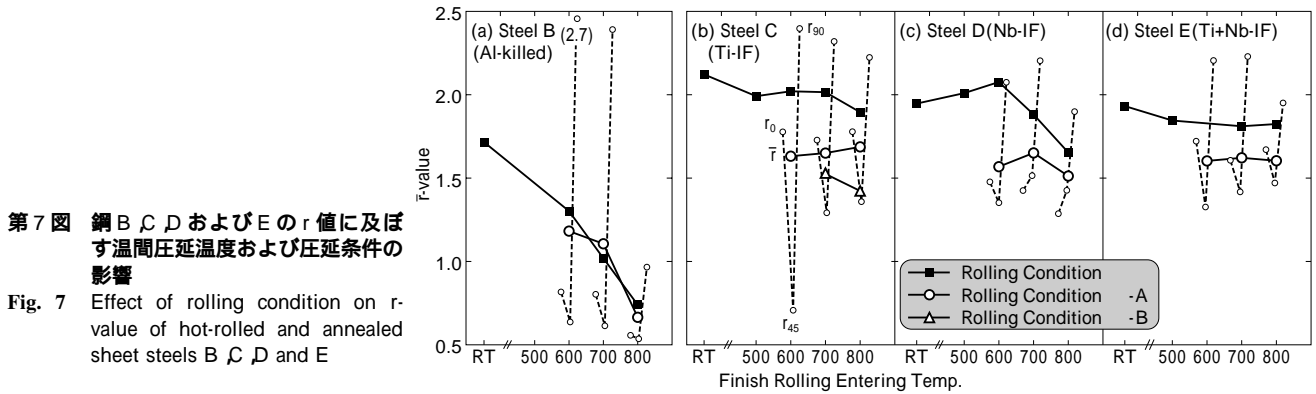
第5図 鋼Aの温間圧延材(750 × 3h 焼鈍)の板厚方向における極密度変化に及ぼす潤滑の影響
Fig. 5 Effect of lubrication (tallow) on the changes in pole density through thickness location in steel A rolled and annealed at 750 for 3h

(554)[225]が認められるようになる。

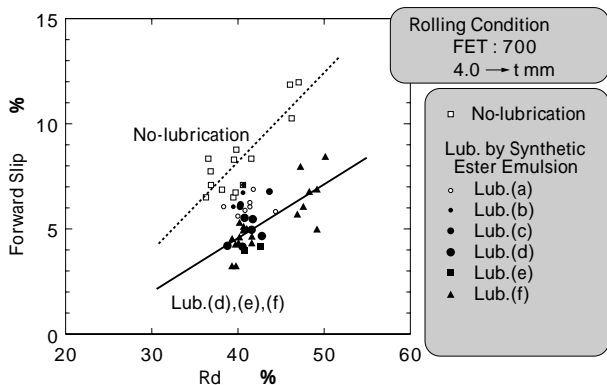
化学成分や圧延条件の影響についてはページ数の関係で詳しく触れないが、その考え方を簡単に紹介する。第7図に牛脂潤滑による域圧延-再結晶焼鈍後の r 値に及ぼす化学成分および圧延条件の影響を示す。極低炭素Alキルド鋼である鋼Bでは室温以外の温間圧延温度では高い \bar{r} 値がえられず、IF鋼が必須条件であることを示している。鋼C~Eに関する結果からわかるようにIF



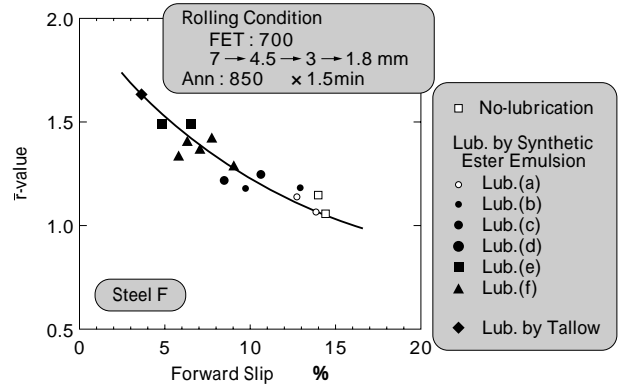
第6図 圧延条件で潤滑圧延された鋼Aの(a)圧延まま材および(b)750 × 3h 焼鈍後の板厚中心部の(200)極点図
 Fig. 6 (200) pole figures at mid plane of steel A rolled with lubricant by rolling condition (a) and annealed at 750 for 3h (b)
 (Finish rolling entering temperature: 700 °C)
 (211)[011̄] (111)[011̄] (111)[112̄]



第7図 鋼B, C, DおよびEのr値に及ぼす温間圧延温度および圧延条件の影響
 Fig. 7 Effect of rolling condition on r-value of hot-rolled and annealed sheet steels B, C, D and E



第8図 温間圧延後の先進率に及ぼす潤滑性能の影響
 Fig. 8 Effect of lubrication properties on forward slip



第9図 r値に及ぼす温間圧延時の潤滑性能の影響
 Fig. 9 Effect of lubrication properties on r-value

鋼においても安定して高い \bar{r} 値を与えるためには700 以下の圧延温度が望ましい。また、圧延条件のように再加熱工程、しかもより高い再加熱温度を採用した場合に \bar{r} 値が大幅に低下している。これらの現象は潤滑圧延といえども仕上圧延時に固溶炭素が存在すると良好な \bar{r} 値がえられないことを示している。

以上のように、熱間圧延ではロール-鋼板表面間の摩擦係数 μ が0.3~0.4 と高いため鋼板表面はせん断変形を受け、板厚方向の変形に不均一を生じる。このため鋼板の中心部では板面に並行に{111}集合組織が形成され、深絞り用冷延鋼板と同等の \bar{r} 値がえられる可能性を有するが、表面に近づくにつれてせん断変形に起因して板面に並行に{110}集合組織が形成されるため、結局、熱延鋼板の \bar{r} 値は1.0以下となる。以上のように、熱延鋼板で深絞り性を高めるためには 域圧延において鋼板表面

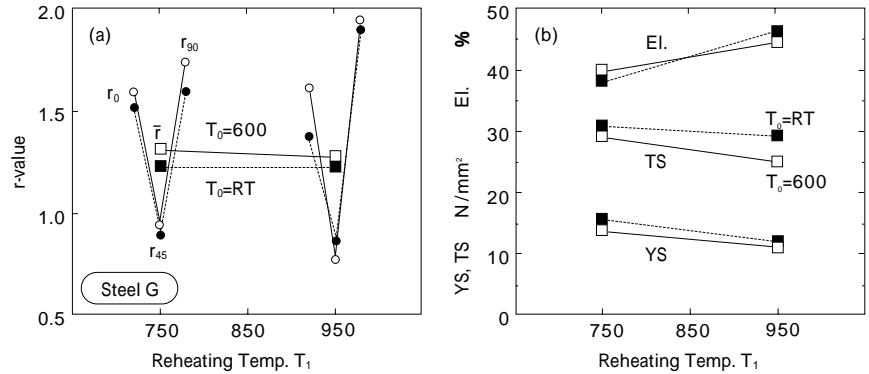
部に生じるせん断変形を出来るだけ抑制することが必要である。

3.2 合成エステル系エマルジョンによる潤滑性能の影響

実機の連続熱間圧延ミルの制約のもとでの潤滑の効果进行调查するため実験的に粘度およびケン化価を変えた各種潤滑剤を体積率1%のエマルジョン状態とし、それらを圧延機の入側よりノズルにてロール表面に散布した。そのときの潤滑性能を先進率で評価し、 \bar{r} 値との関係を調査した。第8図に示すように潤滑を施すことにより先進率が減少し、また、粘度およびケン化価を変えて潤滑性能を高めることにより先進率がさらに減少する。第9図に \bar{r} 値と先進率の関係を示す。 \bar{r} 値は先進率と良好な相関関係を示す。無潤滑圧延材では先進率が大きく、 \bar{r} 値が小さいが、粘度およびケン化価を変えて潤滑性能

第10図 亜急冷凝固後、潤滑圧延した薄鋼板の機械的性質に及ぼす亜急冷終了温度 T_0 および温間圧延再加熱温度 T_1 の影響

Fig. 10 Effects of charging T_0 and reheating temperature T_1 on r-value and tensile properties of sheet steels produced from rapidly-solidified plates



を高めることにより先進率が減少し、それにともなって \bar{r} 値が向上する。牛脂をロール表面に塗布した場合にもっとも先進率が小さく、潤滑性能が良好となる。その結果、ラボ圧延で約 1.65 という高い \bar{r} 値がえられている。

実機の通常圧延材（ほぼ、無潤滑圧延状態）の \bar{r} 値は 0.8~1.0 であるため実機圧延とラボ圧延とは 0.2 程度のバイアスがあり、これらは張力の有無に起因すると推定される。したがって、実機でえられる \bar{r} 値はこのバイアスを考慮すべきであり、実機レベルでの \bar{r} 値の目標を 1.3 以上とすると、先進率を 5% 以下にすることが必要であることがわかる。ちなみに、先進率が 5% のとき “Orowan and Sims の理論” で計算した摩擦係数 μ は約 0.1 である。

3.3 亜急冷凝固 - 温間圧延時の牛脂潤滑の効果

加工用薄鋼板エコプロセス研究会で提案された概念は薄スラブ連続材を出発にしているが、これらは凝固組織を呈しており、粗圧延工程がないため仕上圧延前の組織の微細化が困難なこと、さらに、仕上圧延に至る工程で固溶炭素を少なくする手段が少なくなるなどの不利益がある。

実験室的に亜急冷凝固 - 温間圧延をシミュレートして機械的性質を測定した結果を第 10 図 (a) に示す。いずれの条件でも \bar{r} 値は 1.2~1.3 であり、亜急冷凝固後の再加熱開始温度 T_0 および再加熱温度 T_1 の影響は少ないが、詳細に見ると T_0 が高いほど、また、 T_1 が低いほど高い \bar{r} 値を示している。 T_1 が 700 の場合には 変態、950 の場合には 変態を経て圧延されたことになるが、両者の圧延前の集合組織はいずれもランダムで差がなく、両者の \bar{r} 値の差は圧延前の固溶炭素量の差に起因していると推定される。いずれにしても、亜急冷凝固材を温間圧延してえられた鋼板の \bar{r} 値は牛脂潤滑にもかかわらずそれほど高くない。

JIS 13 号 B 引張試験片による機械的性質を第 10 図 (b) に示す。 T_0 が高いほど、また、 T_1 が低いほど軟質で、かつ EI も高い。従来の製造法にくらべ粗大粒となっており、肌荒れが生じやすくなっているが、これは圧下率

を 90% 以上に高めることにより解決され、同時に \bar{r} 値向上にも寄与するものと考えられる。

むすび = 以上のように冷延鋼板に代替しうる特性、とくに高い r 値を有する熱延鋼板を製造するためには、

- 1) 域圧延において潤滑をおこない鋼板表層部に形成されるせん断集合組織を抑制する
- 2) 圧延に至るまでの工程で固溶炭素量を極力減少させる

などが重要である。

さらに、ラボベースで合成エステル系潤滑剤の 1% エマルジョンをもちいて先進率が 5% 以下となるような潤滑圧延をおこなうことにより約 1.5 の \bar{r} 値をえた。

また、これらを実現するためには実機連続熱間圧延ミルで高潤滑性能を達成しうる潤滑剤の開発およびその圧延技術の確立、さらに、コンパクト化の流れの中で、域圧延において固溶炭素を制御・低減しうる成分設計およびプロセスなどの開発・検討が不可欠である。

参考文献

- 1) 瀬沼武秀ほか：日本金属学会秋期大会シンポジウム講演予稿 (1986 年 10 月), p.137.
- 2) 斉藤好弘ほか：日本金属学会秋期大会シンポジウム講演予稿 (1986 年 10 月), p.134.
- 3) T. Sakai et al.: Trans. JSIJ, 28 (1988), p.1028, & p.1036.
- 4) 瀬沼武秀ほか：鉄と鋼, 73 (1987), p.1598.
- 5) S. Hashimoto et al.: Proc. ICOTOM8 (1987), Santa Fe, ed. by J. S. Kallend et al., TMS - AIME, p.673.
- 6) 橋本俊一ほか：鉄と鋼, 73 (1987), p.1617.
- 7) S. Nakamura et al.: Proc. THERMEC 88, Tokyo (1988), p.644.
- 8) 松岡才二ほか：鉄と鋼, 74 (1988), p.2330.
- 9) 瀬沼武秀ほか：鉄と鋼, 75 (1989), p.782, & p.2330.
- 10) 「加工用薄鋼板のエコプロセスについて」, 日本鉄鋼協会創形創質工学会板箔フォーラム, 1996 年 9 月
- 11) 日本鉄鋼協会第 133 回春期講演大会創形創質工学会シンポジウム “熱延潤滑の現状と今後の課題”
- 12) 塚谷一郎ほか：CAMP - ISIJ, Vol. 1 (1988), p.1690.