

討41

肌焼鋼の結晶粒極微細化とその特性

大同特殊鋼(株) 中央研究所

磯川憲二 ○田中良治
柳谷敏夫

1. 緒言

近年機械構造用鋼についても、各種の制御圧延技術が適用されるようになった。たとえば、棒鋼を切削する前に行なわれていた焼ならしを省略したり⁽¹⁾、熱間鍛造前のシャー切断のために行なわれていた低温焼なましを省略したりする⁽²⁾ことが制御圧延によって可能になってきている。さらにNb等の合金元素を微量添加するマイクロアロイング技術を合せて適用することにより結晶粒の著しい微細化と性能の改善が期待できる。

本研究は、マイクロアロイングと制御圧延とを適用して結晶粒を極微細化し、冷間鍛造性に優れた肌焼鋼を開発することを目的として行なったものである。報告の前半では熱間加工シミュレーターを用いて、棒鋼圧延における結晶粒度に及ぼす各種添加元素と加工条件の影響を検討した結果について、また後半では実機による圧延実験を行なって得た極細粒鋼の特性を調査した結果について述べる。

2. 熱間加工シミュレーターによる基礎実験結果

2.1 実験方法

供試鋼の化学成分をTable 1に示す。鋼A～Dは50kg真空誘導炉で溶製したJIS-SCM420であり、Sol. Al, Nb, Nの含有量を変化させている。鋼塊を1300℃に加熱後一辺50mmの角材に鍛造し、これから試験片を切り出した。また鋼Eは鋼Cに相当する70ton電弧炉溶製材であり、CC鑄片を一辺116mmのビレットに分塊圧延しこれから試験片を採取した。試験片の形状は直径8mm高さ12mmの円柱である。

用いた試験機は真空中で高周波加熱可能な高速圧縮試験機である。試験片を所定の温度に加熱後、温度制御を行ないながら各種の歪量、歪速度で圧縮加工を行なって真応力-真歪曲線を求めた。また加工を終了してから1秒経過後Heガスを吹きつけて室温まで冷却し試験片中心部の旧オーステナイト結晶粒度を測定した。

2.2 実験結果

(1) 結晶粒度に及ぼす合金元素の影響

鋼A～Dを900℃に加熱後800℃で真歪1.05～1.39、歪速度20s⁻¹の条件で圧縮加工した。この加工条件は棒鋼圧延の仕上列での圧延条件を考慮したものである。

加工前後の結晶粒度に及ぼす合金元素および歪量の影響をFig. 1に示す。ベース鋼Aに比べてSol. AlとNを増量した鋼Bの加工後結晶粒は微細化している。またNbを約0.02%添加した鋼Cは加熱時の結晶粒も微細である。しかしNbを約0.05%添加した鋼Dは再結晶するのに要する歪量が大きくなる傾向がある。

これらの結果から極細粒鋼を圧延ままで得るために鋼Cに相当

Table 1. Chemical composition of the steels used.

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Sol. Al	Nb	N
A	0.20	0.25	0.79	0.022	0.020	0.11	0.10	1.00	0.15	0.028	—	0.011
B	0.21	0.25	0.81	0.021	0.021	0.10	0.10	1.00	0.15	0.089	—	0.021
C	0.20	0.25	0.82	0.019	0.022	0.11	0.11	1.00	0.16	0.039	0.021	0.021
D	0.20	0.25	0.82	0.020	0.021	0.10	0.10	0.99	0.15	0.086	0.051	0.028
E	0.19	0.24	0.78	0.015	0.012	0.08	0.05	0.98	0.15	0.037	0.024	0.018

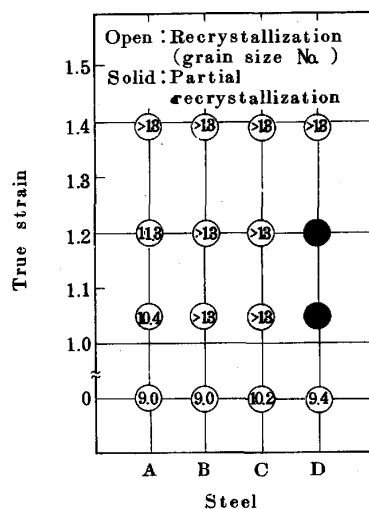


Fig. 1. Effect of alloying elements on the recrystallization behavior and recrystallized grain size.

する成分の鋼を用いることにした。

(2) 結晶粒度に及ぼす加工条件の影響

実機圧延で極細粒鋼を得るための圧延条件を明らかにするため、直径36mmの丸棒を

圧延する場合のパススケジュールをシミュレーションした実験を行なった。パススケジュールの概要をTable 2に示す。なお歪量の計算は矩形換算法⁽³⁾で行なっている。また本実験で用いた熱間加工シミュレーターの最大総歪量は $\epsilon = 1.75$ であるためNo.1~13の全パスを一回の試験ではシミュレーションできない。そこでパスNo.1~6, No.7~10およびNo.11~13に3分割して試験を行なった。供試材は鋼Eである。

パスNo.1~6については、加熱温度を900~1200℃に変化させてその温度で実機圧延と同一に歪量、歪速度およびパス間時間を設定して6段圧縮試験を行なった。加工前および加工後の結晶粒度に及ぼす加熱=加工温度の影響をFig. 2に示す。加工前結晶粒度は加熱温度により細粒から混粒を経て粗粒まで変化しており平均粒度番号はNo.8.6~3.0までばらついている。しかし加工後結晶粒度はNo.9.4~7.4の再結晶した整細粒になっている。

パスNo.7~10については、温度900~1200℃で1段予備加工を行なって結晶粒度をNo.2.6~No.10.0に変化させた後、加工温度を900℃一水準にして4段圧縮試験を行なった。またパスNo.11~13についても同様に加工前粒度を変化させてから、加工温度を800℃一水準にして4段圧縮試験を行なった。結果をFig. 3に示す。パスNo.11~13については加工前粒度が約No.8より粗粒であると加工後の結晶粒は部分再結晶粒となり、平均粒度

Table 2. Pass schedule of bar rolling (36mm dia.).

Pass No	13
True strain	0.101~0.432
Strain rate	0.94~4.22 s ⁻¹
Billet size	148 mm square

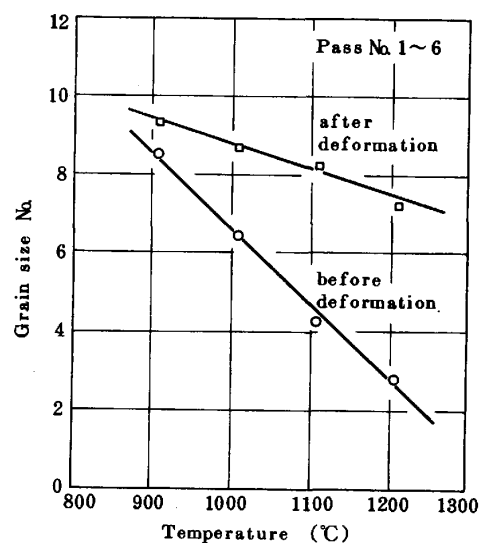


Fig. 2. Effect of deformation conditions on the grain size (Pass No. 1~6).

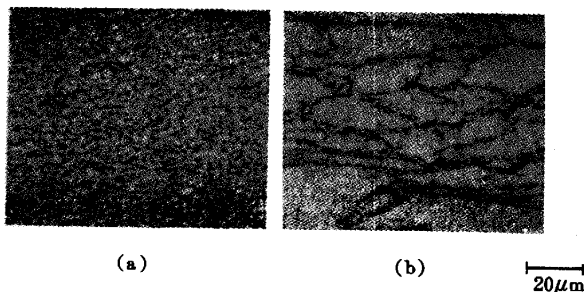


Photo 1. Austenite grain size.

- (a) >No.13 (No.10.0 before deformation)
- (b) Partial recrystallized grain (No.5.9 before deformation)

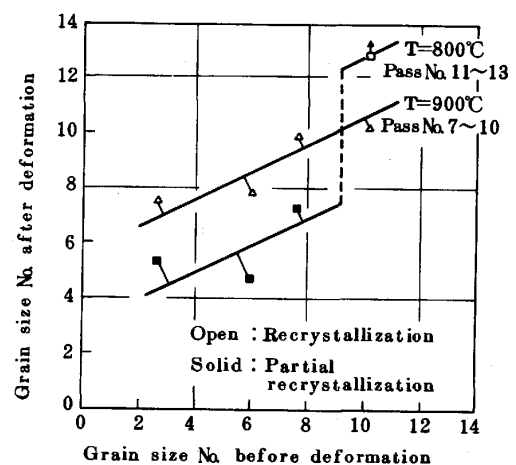


Fig. 3. Effect of deformation conditions on the grain size (Pass No. 7~13).

番号が小さくなる。しかし加工前粒度がNo 10の場合は、粒度No 13を越える極細粒が得られた。得られた結晶粒をPhoto. 1に示す。

以上の実験より、最終的に結晶粒度No 12以上の極細粒を得るためには、

- 加熱温度1100℃以下(粒度No 4以上)
- パスNo 1~6での加工温度1100℃以下(粒度No 8以上)
- パスNo 7~10での加工温度900℃(粒度No 10以上)
- パスNo 11~13での加工温度800℃(粒度No 12以上)

の条件が必要であることがわかった。

(3) 変形抵抗に及ぼす加工条件の影響

実機圧延での所要圧延動力を計算するため、鋼Eの変形抵抗に及ぼす歪量、歪速度および加工温度の影響を調査した。加熱温度は1000℃であり1段圧縮試験を行ない、真応力-真歪曲線を測定した。この曲線から歪量 $\epsilon = 0.15 \sim 0.30$ での平均変形抵抗

$$K_{fm} = \int_0^{\epsilon_1} K_f d\epsilon / \epsilon_1 \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad \text{式(1)}$$

を求めた。

結果の一部をFig. 4~6に示す。従来から言われているように $\ln K_{fm} \propto \ln \epsilon$, $\ln K_{fm} \propto \ln \dot{\epsilon}$ および $\ln K_{fm} \propto 1/T$ の関係が成立している。 K_{fm} をこれらの因子で重回帰分析した結果を式(2)に示す。

$$K_{fm} = 2.789 \epsilon^{0.2174} \dot{\epsilon}^{0.0652} \cdot \exp(2201/T) \quad \text{式(2)}$$

ただし ϵ : 真歪, $\dot{\epsilon}$: 歪速度(s^{-1}), T : 温度($^{\circ}\text{K}$)

3. 実機圧延試験結果

3.1 実験方法

以上の基礎実験結果に基づいて、圧延条件設定を行なった。まず2.2(2)で得られた所要圧延温度スケジュールを得るためのビレット加熱温度と中間水冷条件を決定した。圧延温度の計算には放射温度降下、加工温度上昇、ロール接触温度降下および水冷温度降下を考慮している。次に2.2(3)で得られた K_{fm} を用いて各圧延パス毎に所要動力を計算し、許容動力と比較した。なお K_{fm} に対する歪累積効果は無視している。

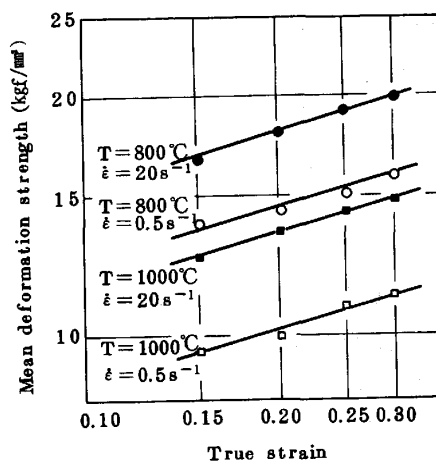


Fig. 4 Effect of true strain on the mean deformation strength.

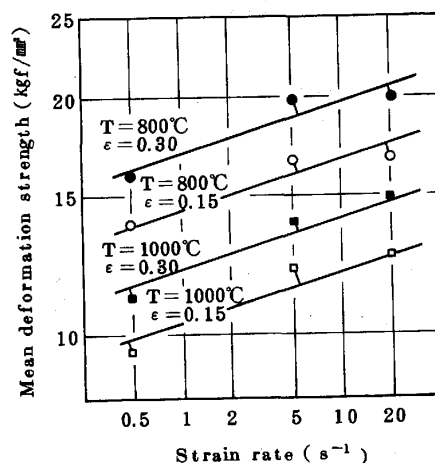


Fig. 5 Effect of strain rate on the mean deformation strength.

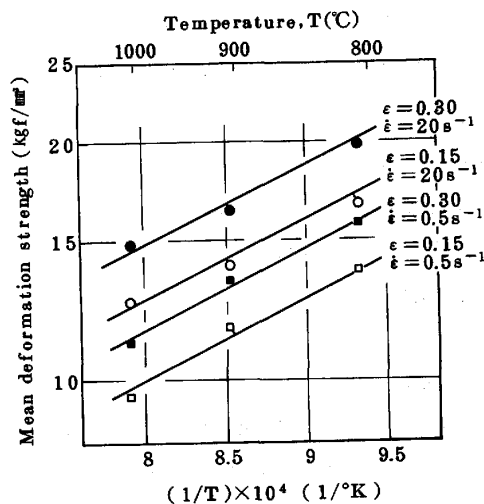


Fig. 6 Effect of temperature on the mean deformation strength.

このように設定した圧延条件で、Table 3 に示す組成の JIS-SCr420 を直径 30mm の丸棒に圧延した。ビレット加熱温度は 950℃、圧延仕上温度は 800℃である。なお比較のため、本鋼種を用いた従来条件（加熱 1100℃、仕上 950℃）での圧延も実施した。

圧延材より圧延方向に平行に試験片を採取し、組織観察、機械試験および冷間鍛造性を評価するため冷間圧縮試験を行なった。この場合の試験片形状は直径 6mm、高さ 11.5mm であり、両端面を MoS_2 で潤滑している。

3.2 実験結果

圧延材のミクロ組織 (Photo. 2)、機械的性質 (Table 4) および冷間鍛造性 (Fig. 7) を示す。従来条件に比べて、本条件で圧延した鋼材の結晶粒は微細であり、靱延性と冷間鍛造性が顕著に改善されている。

4. 結 言

マイクロアロイングと制御圧延を利用することにより結晶粒を極微細化し、冷間鍛造性に優れた肌焼鋼を開発することを目的として研究を行なった。

その結果

- (1) 熱間加工シミュレーターによる基礎実験から
 - (a) Nb の微量添加 (0.02%)
 - (b) Al, N 量の適正化 (0.04% Al, 0.02% N)
 - (c) 初期粒度の調整 (No. 4 以上)
 - (d) 加工温度の適正化 (仕上温度 800℃)

により、オーステナイト粒度 No. 12 以上の極細粒が得られることがわかった。

(2) 上記知見を実機圧延に適用した結果、フェライト粒度 No. 11 の極細粒鋼 (SCr420) が得られ、優れた冷間鍛造性を示すことが確認された。

参考文献

- (1) 森井 他：電気製鋼；52(1981), P192.
- (2) 小石 他：鉄と鋼；68(1982), S474.
- (3) Z. Wusatowski: "Fundamentals of rolling" (1969), P216.

Table 3. Chemical composition of the steels used.

(wt %)												
Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Sol. Al	Nb	N
F	0.22	0.28	0.85	0.014	0.010	0.13	0.06	1.22	0.02	0.045	0.016	0.018

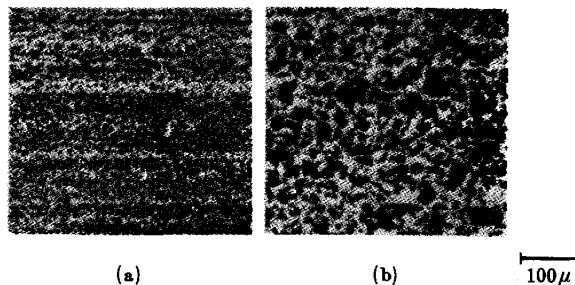


Photo. 2. Microstructure of as-rolled bars.

- (a) Controlled rolling (Ferrite grain size No. 11)
- (b) Conventional rolling (Ferrite grain size No. 9)

Table 4. Effect of rolling conditions on the mechanical properties.

Rolling conditions	0.2% Proof strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Reduction in area (%)	Charpy impact value (kgf-m/cm ²)
Controlled	44.8	63.6	82.0	69.0	23.6
Conventional	46.6	71.7	25.8	55.0	9.5

Specimens (Tensile test: JIS No. 4)
(Charpy test: JIS No. 8)

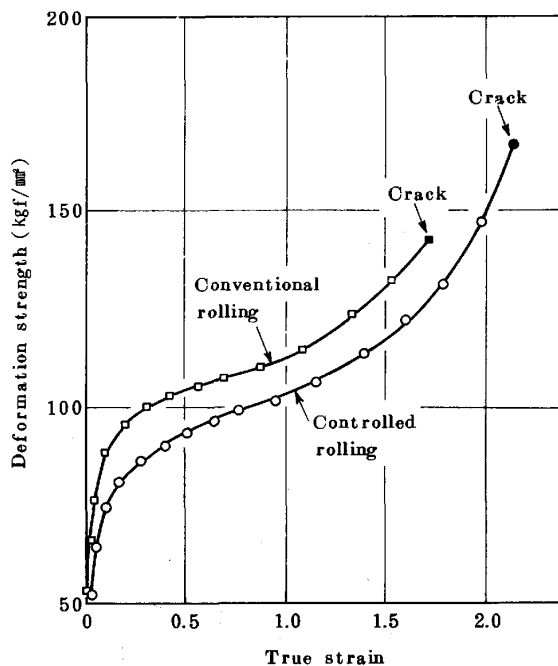


Fig. 7. Effect of rolling conditions on the cold formability.