

討38 極低炭素冷延鋼板の材料特性におよぼす合金元素添加の効果

川崎製鉄 (株) 技術研究所 ○佐藤 進 小原隆史 西田 稔

1. 緒 言

近代鉄鋼業において連続化は時代のすう勢である。冷延鋼板の連続焼鈍プロセスがこの好例といえる。ところが、自動車外板などに使用される深絞り用冷延鋼板を連続焼鈍プロセスで製造することは容易でなかった。これは箱焼鈍法で用いられていた低炭素アルミキルド鋼を素材とするのでは、連続焼鈍で十分な延性、深絞り性および耐時効性を確保することが困難なためである。一方 0.005~0.010% C 鋼に C (および N) 量に対し過剰な Ti あるいは Nb を添加した鋼 (IF 鋼, Fig.1 参照) では、熱延板の段階で C (N) を析出固定しているために連続焼鈍でも優れた特性を示す。しかし、合金添加量が多いため素材コストが高い、表面性状に劣るなどの欠点があった。

これに対し、C 0.003~0.005% で従来の IF 鋼より合金添加量が少ない鋼を用いかつ熱延条件を制御することにより優れた材質が得られることが明らかになった^{1,2)} (改良型 IF 鋼, Fig.1 参照)。本報では最初にこの点について説明する。また連続焼鈍用としての用途拡大に伴い、極低炭素鋼の溶製技術の進歩はめざましく 0.001~0.003% C 鋼が安定的にかつ経済的に製造できるようになった³⁾。この種の鋼における合金元素の役割を明らかにすることが第 2 のテーマである。

2. 極低炭素冷延鋼板の材料特性と熱間加工条件

真空溶製した極低炭素アルミキルド鋼 (C = 0.004~0.005%, Al = 0.04%) に有効合金量を原子比で約 1 添加した冷延鋼板の材質と熱延圧下率、速度の関係を Fig.2 に示す (実験室熱延, 加熱温度 1250℃, 巻取相当処理 700℃-5h, 焼鈍 830℃-40s)。なお本報で有効合金量とは Ti の場合のみ S, N と結合する分を差し引いた量であり、その他の元素については全含有量とする。Ti 鋼, Nb 鋼いずれも熱延の圧下率、速度の増加により材質が著しく向上する。この現象はさらに高速度、高圧下率圧延が可能である工場熱延にて確認された。

熱延圧下率の異なる Nb 添加熱延板の透過電顕組織を Photo. 1 に示す。高圧下率のもの析出物は大きくかつ粗な分布であるのに対し、低圧下率のものには 100Å 以下の微細析出物が高密度で存在する。これは Fig.3 に示すように高圧下率、高速度で熱延すると、歪誘起析出により高温の熱延時に析出が促進され粗大な析出物を形成し、

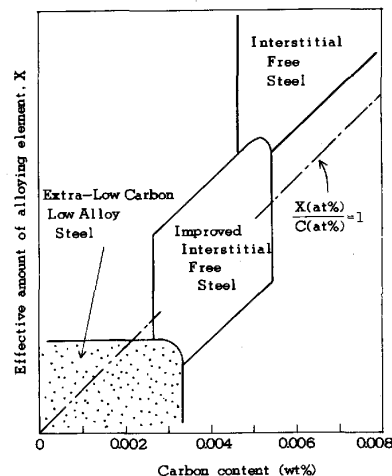


Fig. 1. Schematic classification of extra-low carbon cold-rolled steel sheets with alloying elements.

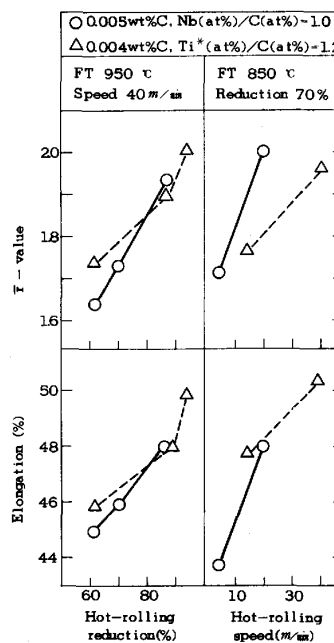


Fig. 2. Effect of hot working conditions on the mechanical properties of extra-low carbon cold-rolled steel sheets containing Nb and Ti.

$$\bar{r} = (r_L + r_C + 2r_D) / 4$$

$$Ti^*(\%) = Ti(\%) - (48/32)S(\%) - (48/14)N(\%)$$

さらにそれに伴い熱延後の低温域で析出する微細析出物が減少することに起因する。

熱延板の集合組織，結晶粒径および時効指数（固溶C，N量）におよぼす熱間加工条件の影響は小さかった。したがって，焼鈍材の特性におよぼす熱間加工条件の影響は熱延母板での析出物の分布形態の変化で説明できる^{2,4)}。

なお従来IF鋼のようにC量に対し過剰な合金元素を含有する鋼では熱延前の段階で炭窒化物が析出しやすいため熱間加工条件の影響は小さいと考えられる。

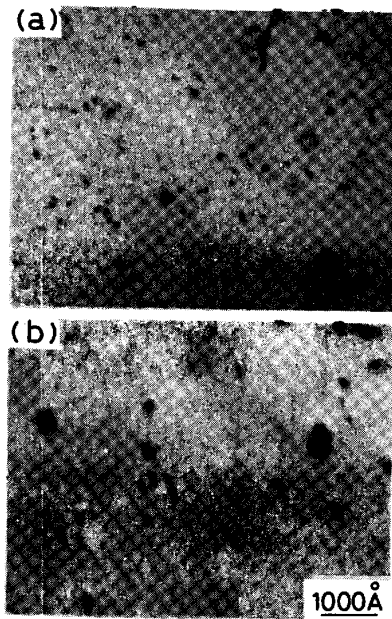


Photo.1. Transmission electron micrographs showing the effect of hot-rolling reduction (a): 62%, (b): 87%) on morphology of precipitates in Nb-added hot-rolled bands.

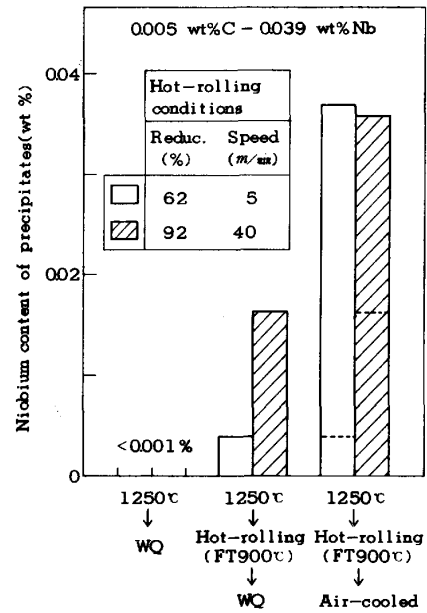


Fig.3. Effect of hot-working conditions on niobium content of electrolytically extracted precipitates in Nb-added extra-low carbon steel.

3. 極低炭素鋼 (C<0.003%)の材料特性と合金元素

Cが0.003%以下となると合金元素を添加しなくても非時効性とでき，合金元素の役割は従来とは異なってくる可能性がある。Fig.4は合金元素を含まない極低炭素アルミキルド真空溶解鋼の材質とC量の関係を示す（実験室熱延，加熱温度1250°C，圧下率87%，速度40m/min，仕上温度880°C，巻取相当処理700°C-1h，焼鈍830°C-40s）。図中L,D,Tは圧延方向に対しそれぞれ0°，45°，90°方向を示す。El, r値ともにC量の低下により上昇するが，その上昇量は比較的小さい。これはEl, r値の面内異方性(ΔEl, Δr)が大きいに起因する。

0.002% C-0.04% Alをベース組成とし，これにNb,Ti,V,WおよびCrを添加したときのElとr値の面内異方性と有効合金量の関係をFig.5に示す（真空溶解鋼，実験室熱延，熱延条件および焼鈍条件はFig.4の場合と同じ）。面内異方性の低減にはNbがもっとも有効であり，ついでTiである。

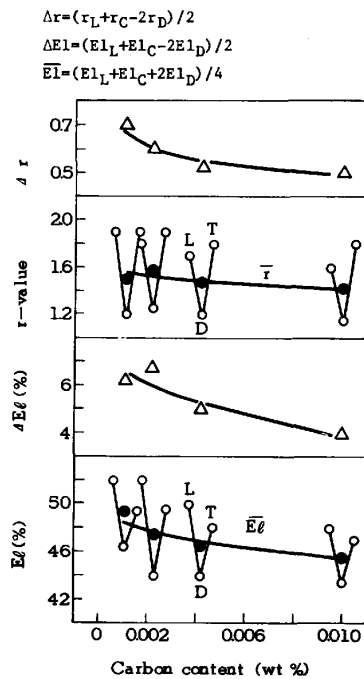


Fig.4. Effect of carbon content on mechanical properties and their planar anisotropy of extra-low carbon steels without alloying elements.

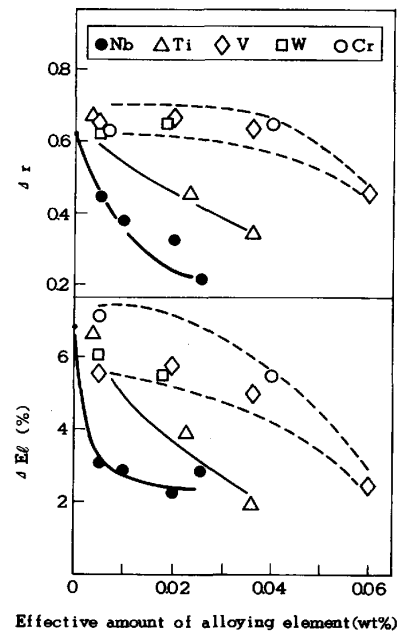


Fig.5. The planar anisotropy of total elongations and r-values in extra-low carbon steels (0.002 wt% C) plotted against effective amount of alloying elements.

この結果に基づいて行なった工場実験の結果を次に述べる。底吹転炉とRH脱ガス装置の組み合わせにより溶製された0.002% C-0.04% Al鋼のr値とΔrにおよぼすNb添加量の関係をFig. 6に示す(熱延加熱温度1220℃, 仕上温度880℃, 巻取温度700℃, 焼鈍820℃-30s)。0.003~0.006%の微量Nbの添加により, D方向のr値は大きく向上し, その結果Δrが減少し \bar{r} が上昇する。Fig. 7はこの焼鈍板の(200)極点図を示す(a)無添加鋼, (b)0.006% Nb鋼)。Nb添加鋼では{111}<011̄>および{111}<112̄>方位への集積が強いのに対し, 無添加鋼の場合はこれらの方位のほかに{110}<001>から{100}<001>への<001>//RD方位が強い。<001>//RD方位はD方向のr値を低下させることが知られている⁵⁾。無添加鋼のr値の面内異方性が大きいのは焼鈍板に形成された<001>//RD集合組織によるものである。

再結晶集合組織に影響する因子を明らかにするために, Fig. 6に示した試料について熱延母板の組織を調査した。Nb添加量が増加すると熱延板中の析出物の密度はわずかに増加した。このことはFig. 8に示すように熱延板の時効指数がNbの増加により単調に減少することからも示唆される。これに対し熱延板の結晶粒は微量のNb添加により著しく微細化する(Fig. 8)。しかし熱延板および冷延板の集合組織にNb添加の影響は認められなかった。熱延母板における析出物の増加, 固溶Cの減少および結晶粒の微細化はいずれも{110}<001>近傍方位の発達を抑制しうる因子である。しかしなが本供試鋼の場合はNb添加による熱延母板の結晶粒微細化がもっとも重要な因子といえる。

Nbは熱延時r相の再結晶を抑制する効果が強い元素として知られている。この効果は固溶NbあるいはNbC(N)析出物の作用によるものである。Nb-C系平衡溶解度積としてもっとも信頼性の高いと考えられる²⁾次式を用いて, 0.002%C-0.006% Nb鋼におけるNbCの析出量を計算した。

$$\log [Nb][C] = -9100/T + 3.7 \quad (6)$$

その結果この組成鋼では900℃でもNbCが析出しないことになる。したがって熱延母板の結晶粒微細化に対しては固溶Nbの作用のほうが重要といえる。

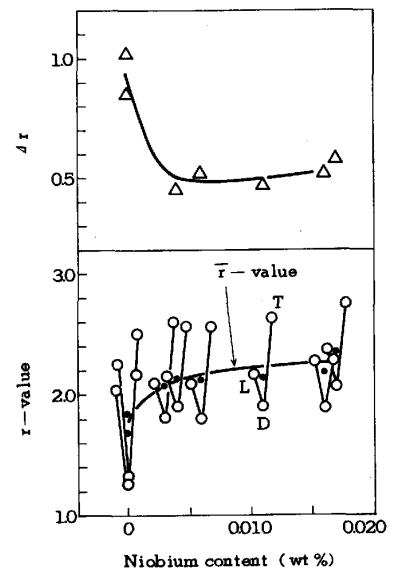


Fig. 6. Effect of Nb content on r-values and their planar anisotropy of factory-made extra-low carbon steels (0.002wt% C).

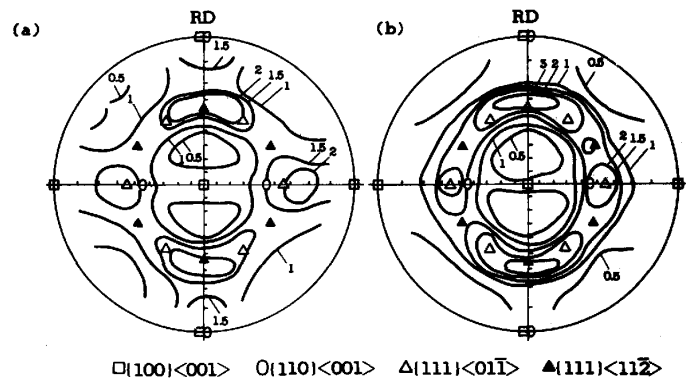


Fig. 7. (200) pole figures showing the effect of Nb content ((a): Nb-free, (b): 0.006 wt% Nb) on recrystallization texture of continuous-annealed steel sheets.

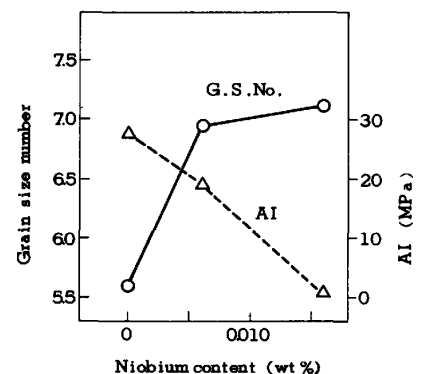


Fig. 8. Grain size number and aging indices of hot bands plotted against Nb content.

4. 低合金極低炭素鋼の材料特性と熱延加熱温度

C量および合金元素量が低下すると一般に炭化物の析出は生じにくくなる。第2章の結果によると析出物は粗大とするほうが材質に有利である。そこで熱延の加熱温度を変化させて析出物の形態制御を試みた。0.002% C鋼に Nb, Ti を微量添加した真空溶解鋼の材質におよぼす加熱温度の影響をFig.9に示す(実験室熱延, 仕上温度880℃, 熱延圧下率87%, 熱延速度40m/min, 低温巻取相当処理, 焼鈍830℃-40s)。加熱温度の低下により材質は向上し, 工業的には低温巻取化が可能となる。材質の向上はとくに Ti 添加鋼で大きい。つぎに加熱時における各種析出物の量を熱延板の析出物量に対する割合でFig.10に示す。低温加熱するとNb鋼ではAlNとMnSの析出量が増加するがNbCは検出されない。

Ti鋼の低温加熱時におけるTi(C,N), TiSの析出量は熱延板とした状態での析出量にはほぼ等しい。またTi鋼の析出物はNb鋼のものより粗大であった。

低温加熱は析出物を粗大とできるので焼鈍材の材質向上に有効であり, とくにTi鋼ではNb鋼よりも高温域で炭窒化物, 硫化物が形成されるので低温加熱の効果が大きいものと考えられる。

5. 結 言

連続焼鈍プロセスによる深絞り用冷延鋼板の製造を目的とし, 極低炭素冷延鋼板の材料特性におよぼす合金元素添加の効果を調べた。

- (1) 0.003~0.005% C鋼に従来のIF鋼よりも少量の合金添加鋼(C量に対する有効合金量が原子比で約1)を高速, 高圧下率で熱間圧延すると微細析出物を低減でき優れた特性が得られる。
- (2) C<0.003%としても面内異方性が大きく材質の向上は小さいが, 微量のNbまたはTiの添加により熱延板の結晶粒を微細化でき面内異方性の低減と特性向上が図れる。
- (3) 熱延加熱温度を下げると熱延前に炭窒化物等を粗大化でき低温巻取でも優れた特性が得られる。この効果はTi添加鋼で大きい。
- (4) 合金元素を含むC0.001~0.005%の極低炭素鋼では従来のIF鋼とは異なり加熱温度や圧下率などの熱延条件が重要である。

参 考 文 献

- 1) 橋本 修, 佐藤 進, 田中智夫: 鉄と鋼, 67(1981), P.1962
- 2) 佐藤 進, 入江敏夫, 橋本 修: 鉄と鋼, 69(1983), P.283
- 3) 浜上和久, 森下 仁, 吉村啓介: 鉄と鋼, 68(1982), S 858
- 4) 佐藤 進, 小原隆史, 西田 稔: 鉄と鋼, 69(1983), S 595
- 5) 北川 孟, 片山道雄: 鉄と鋼, 62(1976), P.1339
- 6) R.P. Smith: Trans. Metall. Soc. AIME, 239(1967), P.1651

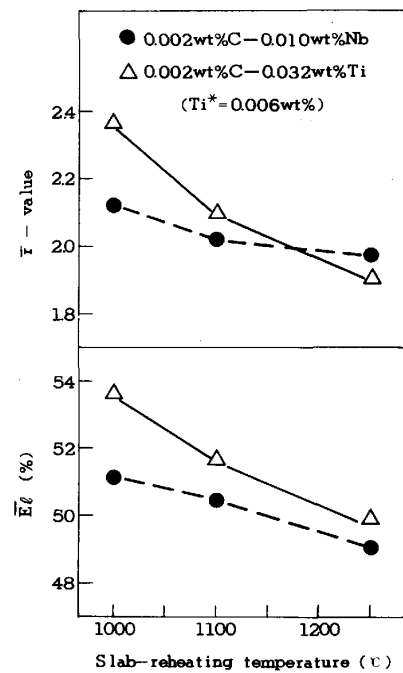


Fig. 9. Effect of slab-reheating temperature (soaking time: 20 min) on the mechanical properties of extra-low carbon cold-rolled steel sheets with Nb and Ti.

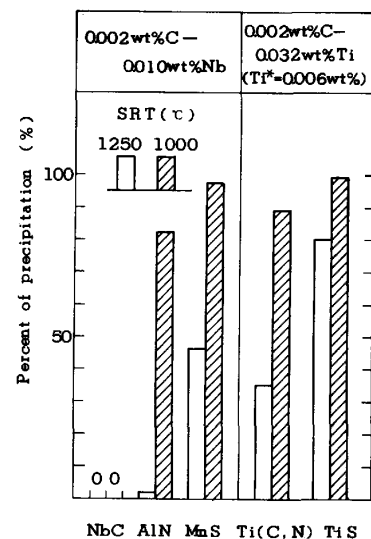


Fig. 10. Percent of precipitation in reheated and water-quenched slabs to that in hot-rolled bands (SRT: Slab-reheating temperature).