

討29 直接焼入れプロセスにおけるボロンの粒界偏析挙動と焼入性

住友金属工業(株) 総合技術研究所 ○鎌田芳彦 蔵保浩文 渡辺征一

I 緒言

ボロン (B) の焼入性向上効果はオーステナイト (γ) 粒界に偏析しフェライト (α) の生成を抑制することにより発揮されるが、直接焼入れプロセスでの検討は不十分である。⁽¹⁾ 一方、圧延加工中あるいは圧延加工後の B の粒界偏析挙動は γ 粒の再結晶挙動に大きく左右されることが近年知られてきている。^{(2)~(4)} 本報告は Nb 量および圧延仕上温度を変えることにより圧延後の再結晶挙動をコントロールして、B の粒界偏析状態を変え直接焼入れプロセスにおける焼入性について検討したものである。

II 実験内容

Table 1. Chemical composition (wt.%)

Table 1 に供試材の化学成分を示す。NbTiB, TiB, NbTi の 3 種類に大別できるが、いずれも真空 150 kg 溶製材である。溶製後 150 mm^t × 100 mm^w に鍛伸した後圧延実験に供した。15 パス圧延により 38 mm^t に仕上げ約 10 秒後に水冷を行い、板厚中心部で 11°C/s の冷却速度にて室温まで急冷した。この時加熱あるいは仕上温度を変化させ、各成分系の強度・靱性に及ぼす影響を調査した。さらに光顕および電顕によるマイクロ組織観察を行うとともに、Fission Track Etching 法 (FTE) による B の偏析状況の観察を行なった。また B の状態別定量を行い、直接焼入れプロセスにおける焼入性について B の粒界偏析挙動の観点から検討した。

Steel	C	Si	Mn	Sol Al	Nb	Ti	B	N
A NbTiB	0.08	0.19	1.34	0.025	0.006 ~0.030	0.009 ~0.013	0.0003 ~0.0015	0.0006 ~0.0072
B TiB		?	?	?	—	0.006 ~0.009	0.0007 ~0.0020	0.0008 ~0.0042
C NbTi		0.21	1.41	0.052	0.001 ~0.014	0.007 ~0.012	—	0.0007 ~0.0073

(P, S < 0.005)

III 実験結果

III-1. 直接焼入れ焼戻 (DQT) 時の加熱・圧延条件と強度・靱性

Fig. 1 は直接焼入れ焼戻時の加熱・圧延条件による強度・靱性の変化について、N 量の違う NbTiB 鋼を用いた場合の結果を示す。加熱温度の上昇は強度の上昇とそれに伴う靱性の劣化を示す。しかし、1050°C を越える加熱では強度上昇は飽和傾向を示すが靱性の低下は依然として生じる。N 量に着目すると、20 ppm 未満 (H19, H22) の場合強度上昇が大きく、40 ppm を越える場合 (H20, H21) 靱性の低下が著しい。仕上温度の影響についても N 量の依存性が認められ、20 ppm 未満の場合 800°C 付近の仕上温度で最高強度を示し靱性も良好である。40 ppm を越える場合は仕上温度低下に伴い強度は低下するが同様に 800°C 仕上圧延時に最良の靱性を示す。

III 実験結果

III-1. 直接焼入れ焼戻 (DQT) 時の加熱・圧延条件と強度・靱性

Fig. 1 は直接焼入れ焼戻時の加熱・圧延条件による強度・靱性の変化について、N 量の違う NbTiB 鋼を用いた場合の結果を示す。加熱温度の上昇は強度の上昇とそれに伴う靱性の劣化を示す。しかし、1050°C を越える加熱では強度上昇は飽和傾向を示すが靱性の低下は依然として生じる。N 量に着目すると、20 ppm 未満 (H19, H22) の場合強度上昇が大きく、40 ppm を越える場合 (H20, H21) 靱性の低下が著しい。仕上温度の影響についても N 量の依存性が認められ、20 ppm 未満の場合 800°C 付近の仕上温度で最高強度を示し靱性も良好である。40 ppm を越える場合は仕上温度低下に伴い強度は低下するが同様に 800°C 仕上圧延時に最良の靱性を示す。

Fig. 2 は Fig. 1 に示す圧延材の直接焼入れままにおい

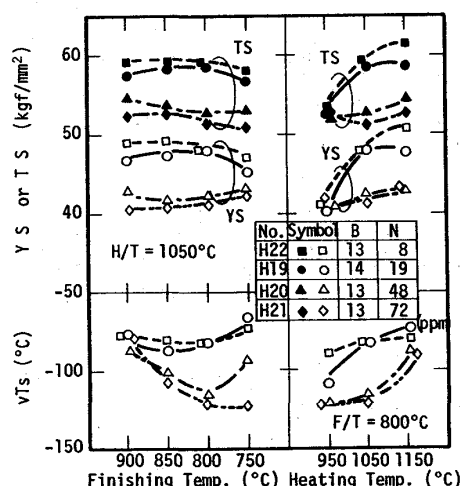


Fig. 1. Effect of heating temperature and finishing temperature on mechanical properties of direct quench and temper processed NbTiB steel plates in various N content. (temper: 500°C × 30min AC)

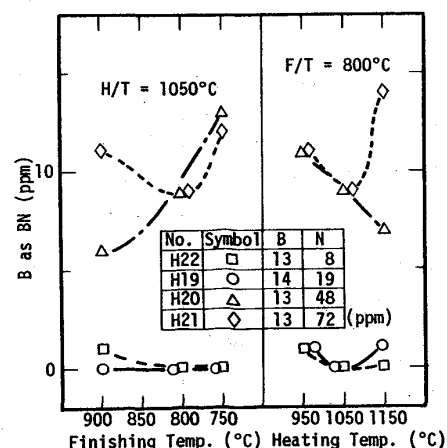


Fig. 2. Effect of heating temperature and finishing temperature on formation of BN. (as DQ)

てBNとしてとらえられたBの値⁽⁶⁾を示す。N量が20ppm未満と40ppm越えて 強度・靱性の挙動が異なるのは、Bが free なBとして存在しているか否かに起因しているといえよう。また高N側での高温加熱時の靱性低下現象はBN形成に起因したものであることが示唆される。一方、Bの焼入性が発揮されている低N側では一般に焼入性が劣るとされる未再結晶 γ 領域からの焼入時にもっとも強度・靱性のレベルが良い結果になっている。

III-2. 仕上温度の影響

Fig. 3はNbTiB鋼とTiB鋼における直接焼入時の強度についての仕上温度依存性を示す。TiB鋼は仕上温度上昇に伴い強度上昇するのに対し、NbTiB鋼では800℃の γ 低温域 仕上時に最高強度を示す。Photo 1にミクロ組織を比較して示す。

TiB鋼に比しNbTiB鋼はフェライトの生成も少なく、

ベイナイトも密な組織を示しており、焼入性の差を明瞭に示している。また750℃仕上材はいずれも2相域仕上となっている。Fig. 4はNbの強度に与える影響を明らかにするため、NbTiB鋼とNbTi鋼を用いNb添加による強度上昇を比較したものである。Nb添加による直接焼入時の強度上昇はBの添加有無により異なり、Bと共存するとその強度上昇は大きくなる。しかし、NbTiB鋼でもNbの固溶がはかられない950℃加熱ではその傾向は消失する。Photo 2は、Fig. 3に示す直接焼入鋼の中心部におけるBの分布状況をFTE法により観察したものを示す。TiB鋼の900℃仕上は明瞭な旧 γ 粒界へのBの偏析が観察されるが、800℃以下の仕上温度では不明瞭な分布となっている。しかし、750℃仕上(2相域)に比べ800℃では一部旧

γ 粒界に偏析している様子が窺え、後に述べる加工 γ の再結晶に追従できなかった様相を呈している。一方、NbTiB鋼では900℃仕上時ポリゴナルな γ の粒界に

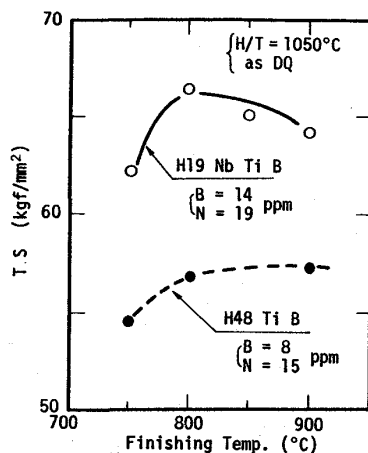


Fig. 3. Effect of finishing temperature on tensile strength of direct quenched NbTiB and TiB steels.

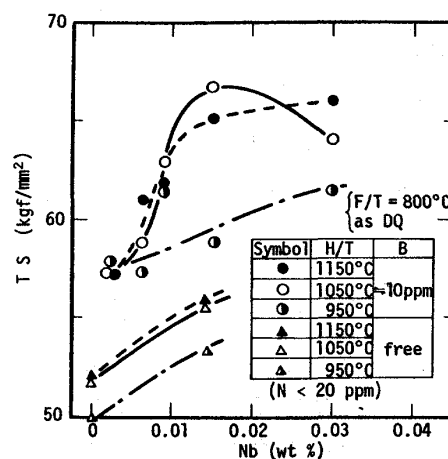


Fig. 4. Effect of Nb addition on tensile strength of direct quenched NbTiB and NbTi steels.

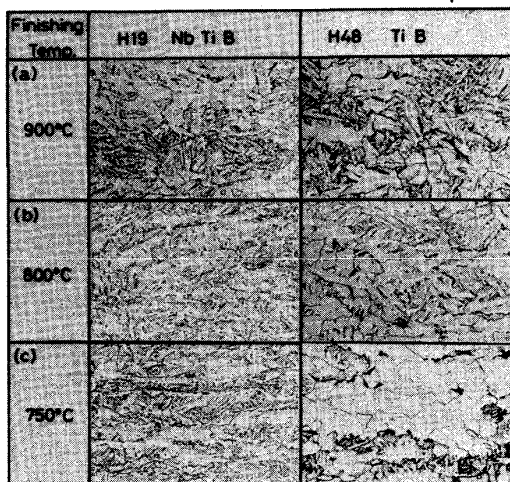


Photo. 1. Change in optical microstructures with finishing temperature in direct quenched NbTiB and TiB steels.

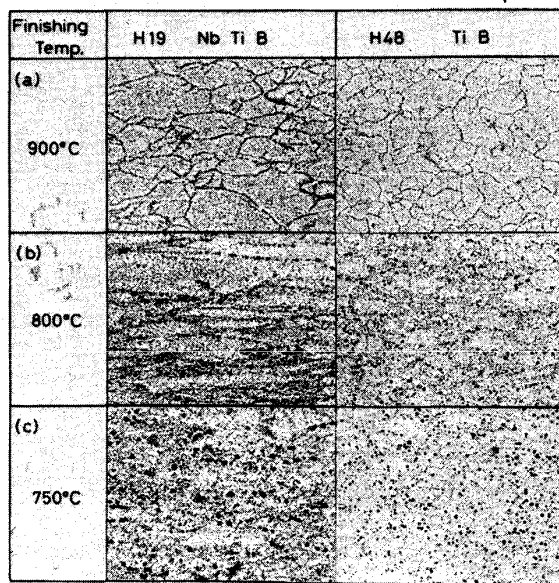


Photo. 2. Change in distribution of boron with finishing temperature in direct quenched NbTiB and TiB steels.

Bが偏析しているのに対し、800℃仕上ではパンケーキ状の γ の粒界と粒内の変形帯と考えられる場所にBが偏析している。750℃仕上ではTiB鋼同様に不明瞭である。

NbTiB鋼とTiB鋼の直接焼入時の強度の仕上温度依存性が異なるのは、Nbの有する再結晶抑制効果に起因していると考えられ、NbTiB鋼ではBの偏析する粒界が保持されるため低温 γ 領域まで安定した焼入性が得られるのであろう。

Ⅲ-3. 加熱温度の影響

Fig. 5はNbTiB鋼とTiB鋼の直接焼入時の強度の加熱温度依存性を示す。両鋼種とも加熱温度が950℃から1050℃と高くなると強度上昇が生じる。これは初期 γ 粒の粗粒化と、NbTiB鋼ではNbの固溶によるBとの前述の相乗作用の結果といえる。一方、1150℃と加熱温度をさらに高くするとその上昇傾向は飽和あるいは逆に低下傾向となる。Photo 3にFTE法によりBの分布状況を観察した結果を示す。両鋼種とも1150℃加熱の場合、Nに対して化学量論以上のTiを添加することによりBをfreeなNから守っている成分系であるにもかかわらず、部分的にBの塊状の析出物が形成されている。さらに詳細な検討が必要とされるが、1150℃加熱時に生成する微量なNがBNを形成することによりBの粒界への偏析を阻害したものと考えられる。

Ⅲ-4. 直接焼入プロセスにおけるBの粒界偏析挙動と焼入性

Fig. 6はNbTiB鋼における強度(TS)と状態別定量により求めたSol.Bとの相関を示す。TSはSol.Bが10ppm付近に最高値をもつ傾向にあるが、900℃仕上と800℃仕上で若干その傾向が異なる。900℃

仕上では800℃仕上に対し、低Sol.B領域で高TSを示し高Sol.B領域で低TSを示す。かつ、900℃仕上では10ppm付近に極値が存在するのにに対し、800℃仕上ではさらに高Sol.B側へ移行する様相を呈している。

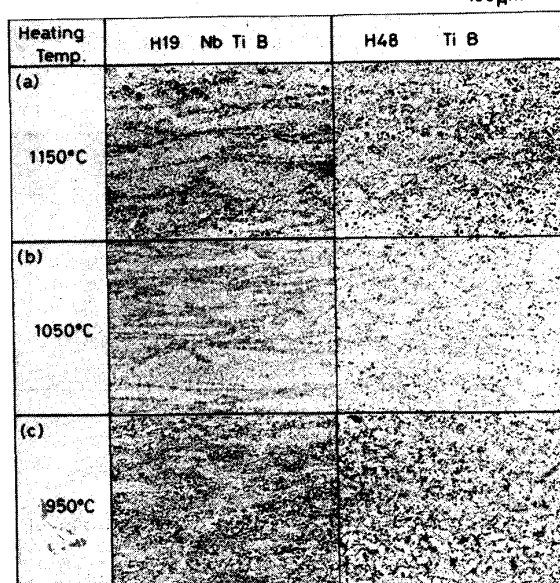


Photo. 3. Change in distribution of boron with heating temperature in direct quenched NbTiB and TiB steels.

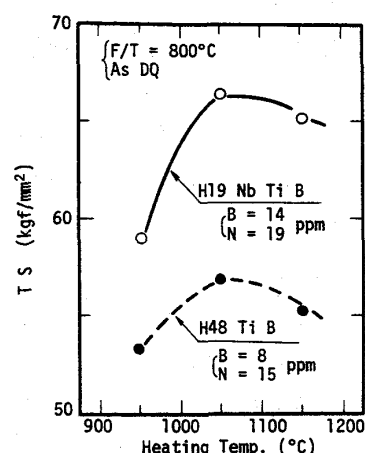


Fig. 5. Effect of heating temperature on tensile strength of direct quenched NbTiB and TiB steels.

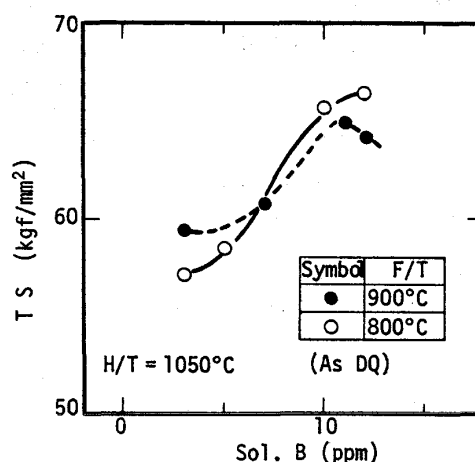


Fig. 6. Effect of Sol.B on tensile strength of direct quenched NbTiB steel. (Sol.B = Total B - B as (BN + Borocarbide))

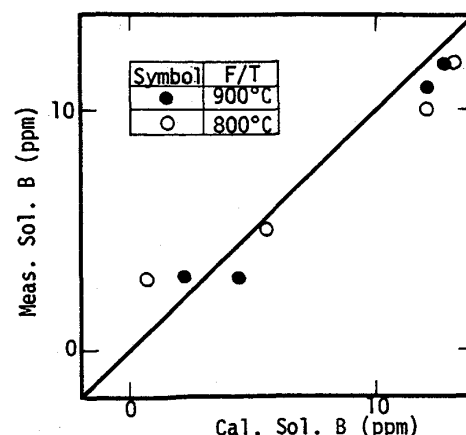


Fig. 7. Correlation of measured Sol. B and calculated Sol. B.

直接焼入プロセスにおけるBの焼入性の活用は、圧延による再結晶が生じ粒界の移動を伴うような状態からの焼入であり、従来の熱処理における平衡状態のBを活用する場合より約3倍多い10 ppm付近に最適な焼入性を有することは定性的に理解される。ここで低Sol.B側で900°C仕上材のTSが800°C仕上より高いのは再結晶 γ と未再結晶 γ の焼入性の差といえる。高Sol.B側で800°C仕上材のTSが高くなるのは、未再結晶 γ でもBの変形帯への偏析によりフェライトの生成は抑制され、逆に加工歪を有した γ からの変態であり加工の影響を継承したためであろう。また800°C仕上材の最適B領域が高い側にシフトするのは、Bの拡散速度の差あるいは変形帯等の不完全部が多く存在するためと考えられる。Fig. 7は仕上温度におけるSol.Bが焼入性に有効であると仮定し計算により求めたCal. Sol.Bと状態別定量により求めたmeas. Sol.Bの相関を示したものである。計算では簡便のためNbTiの複合析出物形成は無視し、Nbは単にNを固定するものとして扱った。Fig. 7は良い相関を示し、直接焼入時の焼入性を発揮するBはその仕上温度にて平衡的に存在しうるSol.Bと仮定して良い。Fig. 8は低N (≤ 15 ppm)のTiB鋼におけるCal. Sol.BとTSの相関を900°C仕上と800°C仕上を対比して示したものである。TiB鋼ではNbTiB鋼と違い800°C仕上が全Sol.B領域にわたり低TS側に位置している。TiB鋼では γ の再結晶抑制効果は期待できないため、圧延中あるいは圧延後 γ は再結晶を生じている。800°C仕上では900°C仕上に比し再結晶粒も小さく、かつBの拡散速度も遅いため新しい粒界への偏析が追従できなくなる。その為、TiB鋼ではNbTiB鋼のような逆転現象は生じないのであろう。

Fig. 9にNbTiB鋼とTiB鋼の直接焼入プロセスにおける焼入性とBの粒界偏析挙動の相関を模式的に示す。Bの焼入性は γ 粒界等に偏析しフェライトの生成を抑制することにより発揮されるため、粒界の移動を阻害するような再結晶抑制効果を有するNbの添加は γ 低温領域まで安定してBの焼入性を活用しうる。一方、Nbのような再結晶抑制効果を有する成分をもたない成分系では、Bの拡散速度を速めかつ γ 粒径の大きい高温仕上が焼入性確保に有効な手段となる。

IV まとめ

直接焼入プロセスにおけるボロンの焼入性を検討するため、Nb量および圧延仕上温度を変えることにより圧延後の再結晶挙動をコントロールしてボロンの粒界偏析状況をかえ、 γ の再結晶挙動とボロンの粒界偏析の相関から考察し、NbTiB鋼とTiB鋼の焼入性の差を明らかにした。

V 参考文献

- (1) たとえば、渡辺、大谷、邦武：鉄と鋼，62（1976）p 66
- (2) 今中、杉江、上田：鉄と鋼，70（1984）S 634
- (3) 今中、志賀、上田：鉄と鋼，71（1985）S 585
- (4) 今中、寺嶋、志賀、田中：鉄と鋼，72（1986）S 609
- (5) 中山、猪熊、蔵保：鉄と鋼，72（1986）S 1300
- (6) C.R. SIMOE et al.: J. of Metals, 8（1956）p 984
- (7) R. HABU et al.: Trans. ISI J, 18（1978）p 492

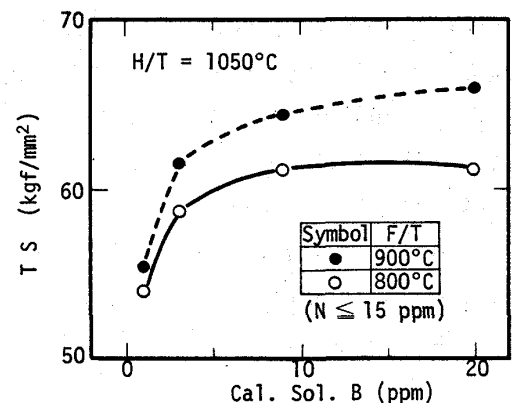


Fig. 8. Effect of Cal. Sol.B on tensile strength of direct quenched TiB steel.

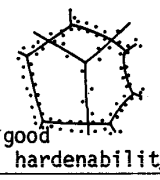
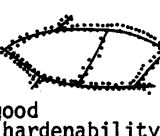
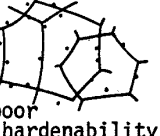
F / T	Nb Ti B	Ti B
900°C		
800°C		

Fig. 9. Schematic distribution of boron atoms in direct quenched NbTiB and TiB steels at various finishing temperatures.