

Mn-Si 系, Mn-Si-Cr 系および Mn-Si-Mo 系鋼に およぼす Ti および B の影響*

(構造用高抗張力鋼の研究—III)

浅野栄一郎**・石田 徹**・丹 秀夫***

Effect of Addition of Ti and B on Mn-Si, Mn-Si-Cr and Mn-Si-Mo Steels.

(Study on high-strength structural steels—III)

Eiichirō ASANO, Tōru ISHIDA and Hideo TAN

Synopsis:

Effects of addition of Ti and B on Mn-Si, Mn-Si-Cr or Mn-Si-Mo structural steel were studied in this report III, while effects of B and Mo on Mn-Si and Mn-Si-Cr steel had been studied in the last report I (Tets-to-Hagané, 47 (1961) 4, p. 585~591).

There were 18 grades of specimens tested. The 1st group contained 6 grades of Mn-Si steel, the 2nd group contained 7 grades of Mn-Si-Cr steel and the 3rd group contained 5 grades of Mn-Si-Mo steel.

All samples were melted with a high-frequency induction furnace and cast into about 7 kg ingots, and then forged or rolled down to 16 or 35mm ϕ bars.

Specimens were tested under various conditions such as air-cooling or furnace-cooling after heating and quench-and-tempering.

Tensile strength, yield strength, elongation and reduction of area were determined by tensile test. Hardness-test and microstructure-tests as well as Jominy-end-quenching test to investigate into hardenability of specimens were also made.

The results obtained were summarized as follows:

- (1) Addition of B to Mn-Si steel containing 0.3% Ti, improved hardness, tensile strength and yield point, and decreased elongation and reduction of area only a little, under the condition of air-cooling or quench-and-tempering at a point higher than 600°C.
- (2) Effects of adding B to Mn-Si-Cr steel with 0.3% Ti on mechanical properties were not recognized apparently.
- (3) Addition of B (0.0025~0.0050%) to Mn-Si-Mo steel containing 0.13% Ti was effective on improvement of hardness and tensile strength, while decrease of elongation and reduction of area was slight. This tendency was very evident in the condition of tempering, especially.
- (4) Ti should be treated as a deoxidizer or denitrider. From the viewpoint of mechanical properties, Ti content should be less than 0.3% in Mn-Si-Cr and Mn-Si-Mo steels. From the viewpoint of hardenability, Ti content should be less than 0.1% in both Mn-Si steel and Mn-Si-Mo steels.
- (5) Addition of B improved hardenability of Mn-Si, Mn-Si-Cr and Mn-Si-Mo steels.

I. 緒 言

前報¹⁾においては Mn-Si 系および Mn-Si-Cr 系鋼におよぼす B ならびに Mo+B 添加の影響について検討し、Mn-Si 系に 0.0050% の B を、また Mn-Si 系に 0.50% Mo + 0.0100% B を添加すれば、焼入れ焼戻し状態の強度をいちじるしく向上せしめ、また焼入性におよ

ぼす B の効果は Mo と併用添加した場合、特に顕著に現われることなどを報告した。

一方、B は Si 程度の脱酸能力を有する²⁾ため、B 添加前に溶鋼を十分脱酸しておかないと [O] と結合し、

* 昭和36年10月本会講演大会にて発表

** 東都製鋼株式会社技術部, 工博

*** 東都製鋼株式会社技術部

鋼の性質に直接的な効果を与えることができない^{(1)~(6)}といわれており、また B 添加を効果あらしめるには [N] を安定させるべき強力な窒化物形成元素を予め添加する必要がある^{(7)~(9)}ともいわれている。

本報では脱酸、脱窒力の異なる Ti を Mn-Si 系, Mn-Si-Cr 系および Mn-Si-Mo 系鋼に B とあわせ添加してその効果の向上を期待し調査を進めた。

II. 試料および実験方法

本実験に使用した試料は、高周波誘導炉にて溶製した 7 kg 鋼塊を 16mm φ および 35mm φ の丸棒に熱間圧延後、920°C × 60mn 空冷の焼ならし処理を行ない、硬さ試験片、引張試験片、ジョミニ一端焼入れ試験片をそれぞれ切削採取し実験に供した。

これらの試料の化学組成を Table 1 に示す。これを大別すれば、I 系は従来の Si-Mn 系に、II 系は Si-Mn-Cr 系に、また III 系は Si-Mn-Mo 系高抗張力鋼にそれぞれ 0~0.0100% の B と 0~0.65% の Ti をあわせ添加したものである。なお、本実験は Ti の強力な脱酸脱窒作用を利用して B 添加の効果を一層あげようとするものであるから、試料の溶製に際しては、Fe-Ti (Ti = 25%) をまず投入してから Fe-Ti-B (B = 5%) を添加して出鋼した。

実験方法としては、本実験が一般構造用高抗力鋼が対象であるので、まず調質以前の使用の場合を考えて圧延後の再加熱後、炉冷、空冷した状態にて調査したほか、油焼入したものに対して焼戻処理を加えて硬さ測定、引

張試験および顕微鏡組織の観察を行ない、かつジョミニ一端焼入れ試験を行なって焼入性を調査した。

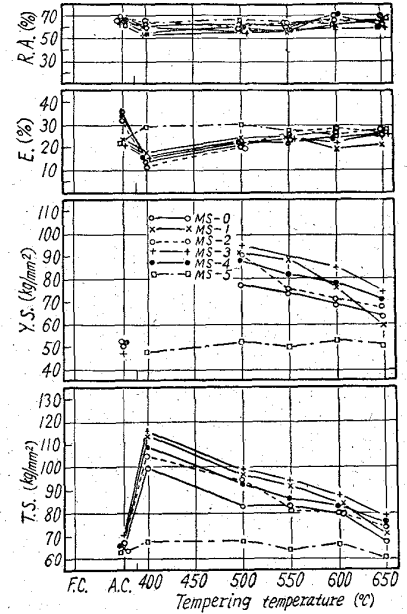
III. 実験結果および考察

(1) Mn-Si 系鋼の機械的性質におよぼす Ti, B の影響

各試料を 910°C × 20mn 加熱後、空冷および油冷したのち 400~650°C の各温度で 50mn 焼戻し油冷して引張試験を行なつ

た結果を Fig. 1 に示す。これより明らかなように、試料 MS-5 を除いては 550~600°C に焼戻しても 80 kg/mm² 以上の引張強さを示し、降伏比は 85% 以上、伸び、絞りもそれぞれ 20~30% 60~70% と HT 80 級の高抗張力鋼としてかなり優れた性質を示している。

Fig. 2 は B を 0.0050% 添加した



F.C.: Furnace-cooled
A.C.: Air-cooled
Fig. 1. Mechanical properties of Mn-Si steel.

Table 1. Chemical composition of steel specimens. (%)

Series	Marks	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ti	B*
I	MS-0	0.17	0.510	1.39	—	—	0.105	—
	MS-1	0.19	0.492	1.30	—	—	0.250	0.0025
	MS-2	0.17	0.542	1.38	—	—	0.200	0.0050
	MS-3	0.19	0.602	1.49	—	—	0.290	0.0100
	MS-4	0.18	0.606	1.33	—	—	0.312	0.0050
	MS-5	0.17	0.556	1.32	—	—	0.650	0.0050
II	MSC-0	0.25	0.484	1.37	0.55	—	0.080	—
	MSC-1	0.27	0.548	1.54	0.55	—	0.260	—
	MSC-2	0.26	0.502	1.51	0.55	—	0.250	0.0025
	MSC-3	0.26	0.500	1.68	0.54	—	0.299	0.0050
	MSC-4	0.25	0.534	1.72	0.53	—	0.300	0.0100
	MSC-5	0.29	0.590	1.70	0.53	—	0.547	0.0050
	MSC-6	0.26	0.514	1.81	0.52	—	0.110	0.0050
III	MSM-0	0.15	0.301	1.17	—	0.60	0.130	—
	MSM-1	0.17	0.402	1.18	—	0.59	0.125	0.0025
	MSM-2	0.18	0.432	1.17	—	0.54	0.129	0.0050
	MSM-3	0.18	0.430	1.17	—	0.54	0.129	0.0100
	MSM-4	0.18	0.474	1.25	—	0.54	0.300	0.0050

* Percentage added.

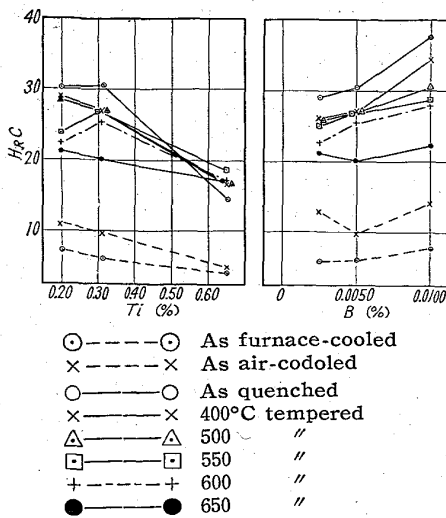


Fig. 2. Effect of titanium and boron on hardness of Mn-Si steel.

場合の Ti 含有量および Ti が 0.3% 存在する時の添加 B 量による硬さの変化を示したものである。

Fig. 1, 2 より, B を 0.0050% 添加した場合, 焼ならし状態における硬さ, 引張強さおよび降伏点の Ti 含有量の多少による差異はほとんど認められない。また焼入れ焼戻し状態においては, 0.2~0.3% までの Ti は硬さ, 引張強さおよび降伏点に顕著な影響をおよぼさないが, Ti 量が 0.65% ではこれらの値はいちじるしく減少し, 焼ならし処理, 焼入れ焼戻し処理温度が変わっても硬さ, 引張強さおよび降伏点はあまり変わらない。焼入れ焼戻し状態における伸びは, Ti 含有量の増加とともに若干増大するが, 焼戻し温度が 550°C 以上になると Ti 量による伸びの差異はほとんど認められなくなる。また絞りは焼ならし, 焼入れ焼戻し状態とも Ti 含有量により顕著な影響を受けているとはいえない。

一方, Ti を 0.3% 含有する試料に 0.0025~0.0100% の範囲で B を添加すると, 添加 B 量の増加にしたがい焼ならし状態の引張強さ, 降伏点は増大するが, 焼入れ焼戻し状態においては B 添加量が 0.0050, 0.0025, 0.0100% の順で高い値を示している。しかし, 0.0050% 添加の場合も前記 2 試料と大差はないが, 焼戻し温度が 600°C 以上になれば添加 B 量の増加とともに引張強さ, 降伏点は増大している。また伸び, 絞りにおよぼす 0.0025~0.0100% の添加 B の明白な影響は認められず, 特に 0.0050% 添加の場合と 0.0100% 添加の場合においてはほとんど差が認められなかつた。

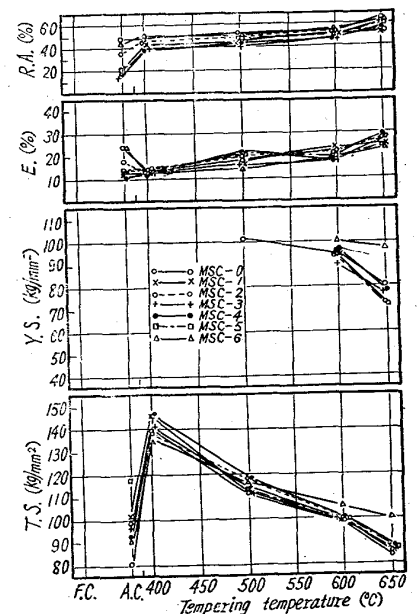
試料 MS-5 は Ti を 0.65% 含有する試料で, 図より明らかなように, B 添加の影響はほとんど消失し, 引張強さ, 降伏点は B を添加していない試料 MS-0 よりも低い値を示し, その上本実験における焼入れ焼戻し

理の温度範囲では熱処理による引張強さ, 降伏点, 伸びおよび絞りにおよぼす影響はほとんど認められず, 特にこの傾向は焼入れ焼戻し状態において顕著である。鋼の γ 域は Ti の添加によりいちじるしく縮小し, Fe-Ti-C 系における γ 界域の範囲図¹⁰⁾によれば, 0.17%C, 0.65% Ti では A_{c3} 点は約 1000°C であるごとく, 試料 MS-5 の A_{c3} 変態点が 0.65% Ti の添加により本実験の焼入れ温度以上に上昇したため, 完全にオーステナイトに変態せず, したがって焼入れが不完全であつたためと考えられる。この場合の顕微鏡組織を観察すると, 焼なましおよび焼ならし状態では, 大部分をフェライト中に Ti-炭化物あるいは窒化物の散在する組織で占め, パーライトはほとんど認められず, 焼入れ焼戻し状態の場合もこれとほとんど同様な組織を呈していることから上述の事実を立証している。

Mn-Si 系鋼の他の試料の顕微鏡組織は, 焼なましおよび焼ならし状態ではフェライト+パーライトの組織でフェライト結晶粒は Ti が最も少量でかつ B を添加していない試料 MS-0 がわずかに粗大化しているが, 他は各試料間にほとんど差異が認められない。また焼入れ焼戻し状態では, ソルバイト状中間段階組織中に初析フェライトが存在する組織を示している。

(2) Mn-Si-Cr 系鋼の機械的性質におよぼす Ti, B の影響

Fig. 3 は各試料を 910°C × 20mn 加熱後, 空冷した場合および油冷したのち 400~650°C の各温度で 50 mn 焼戻し油冷した場合の引張試験結果を示す。B を添加していない場合の Ti 量の機械的性質におよぼす影響を 0.080% Ti の試料 MSC-0 と 0.260% Ti の試料 MSC-1 とで比較すれば, 焼ならし状態における硬さ, 引張強さは試料 MSC-1 の方が高い値を示し, 伸び, 絞りに対しては低い値を示すが, この差も焼入れ焼戻し処理により減



F.C.: Furnace-cooled
A.C.: Air-cooled
Fig. 3. Mechanical properties of Mn-Si-Cr steel.

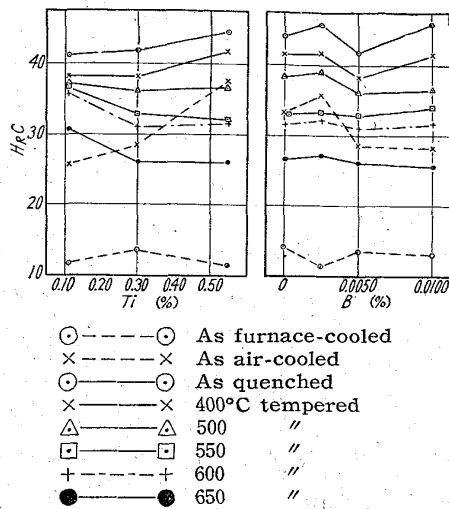


Fig. 4. Effect of titanium and boron on hardness of Mn-Si-Cr steel.

少し、500°C 以上に焼戻せば、ほとんど両者に差異は認められなくなる。

Ti, B 添加量が硬さにおよぼす影響を Fig. 4 に示す。B を 0.0050% 添加したとき、Ti 含有量が 0.1~0.55% まで変化すると、焼ならし状態においては、含有 Ti 量の増加とともに硬さ、引張強さは急激に増大し、これに対し伸び、絞りは Ti 含有量 0.3% までは減少するが、0.55% になると 0.3% の場合とほとんど差異がなくなる。また焼入れ焼戻し状態では、Ti 含有量の増加にしたがい硬さ、引張強さおよび降伏点はわずかに増大するが、焼戻し温度が 550°C 以上になると逆に減少の傾向を示し 0.55% Ti では焼ならし状態における場合よりも低い値となる。この場合、Ti 0.3% まではかなり急激に減少するが、それ以上の Ti 量ではほとんど変化が認められない。また焼入れ焼戻し状態における伸び、絞りは含有 Ti 量が増加しても顕著な影響を受けていない。したがって、B を 0.0050% 添加した本系鋼では焼ならし状態においてのみ Ti 添加の影響が期待できる。

一方、Ti が 0.3% 存在するとき、B を 0~0.0100% の範囲で添加すると、焼ならし状態における硬さ、引張強さは添加 B 量の増加とともに減少するが、0.0050% と 0.0100% 添加の場合の差異はほとんど認められない。同様に焼入れ焼戻し状態では、硬さ、引張強さおよび降伏点の変化は添加 B 量によりほとんど影響を受けておらず、特に 600°C 以上に焼戻した場合にこの傾向は顕著である。また伸び、絞りは焼ならしおよび焼入れ焼戻し状態とも添加 B 量による変化は認められない。かように本系鋼においては B 添加の効果を期待することはあまりできない。

この場合の顕微鏡組織は、焼なまし状態では通常のパーライトとフェライトの組織で、Ti, B 量が増加してもフェライト結晶粒の大きさにはほとんど変動がみられない。焼ならし状態では、Ti を 0.08% 含有し B は添加されていない試料 MSC-0 はフェライトとパーライトの組織であるが、他の試料 MSC-1~MSC-6 では、すでにソルバイト状のパーライトが現われている。焼入れ焼戻し状態では、ソルバイト状中間段階組織で、Mn-Si 系にみられた針状のフェライトはほとんど認められない。

(3) Mn-Si-Mo 系鋼の機械的性質におよぼす Ti, B の影響

本系は先に述べた Mn-Si 系鋼に Mo を 0.5% 添加した鋼につき Ti, B 量を種々変化したもので Fig. 5 に焼なまし、焼ならしおよび焼入れ焼戻し状態における引張試験結果を示す。これから明らかかなように B は Mo の存在により顕著な添加効果をしめし、550~600°C に焼戻した場合、100 kg/mm² 程度の引張

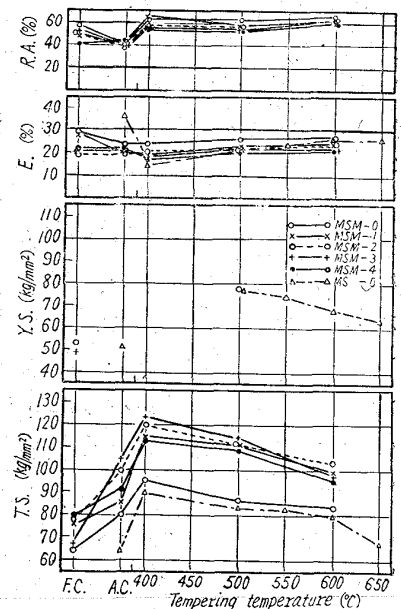


Fig. 5. Mechanical properties of Mn-Si-Mo steel.

強さ、20% 以上の伸び、50% 以上の絞りを示し、調質用低合金高抗張力鋼として本試験ではほぼ満足すべき結果を示している。ここで Mn-Si 系鋼におよぼす 0.5% Mo 添加の影響をみるために試料 MS-0 も例示した。試料 MS-0 と MSM-0 の両鋼を比較すれば、Table 1 から明らかかなように MS-0 は MSM-0 に比し C, Si, Mn 含有量が若干高いにもかかわらず、Mo 0.5% の存在により焼ならしおよび焼入れ焼戻し状態における硬さ引張強さは増大し、特に 600°C 以上に焼戻した場合焼戻し軟化抵抗を示すことが認められる。また焼ならし状態の伸びは MS-0 の方が約 10% も大であるが、焼入れ焼戻し状態では MSM-0 が若干大なる値を示している。しかし、両鋼の差異は焼戻し温度の上昇とともに減少している。絞りについては焼ならしおよび焼入れ焼戻し

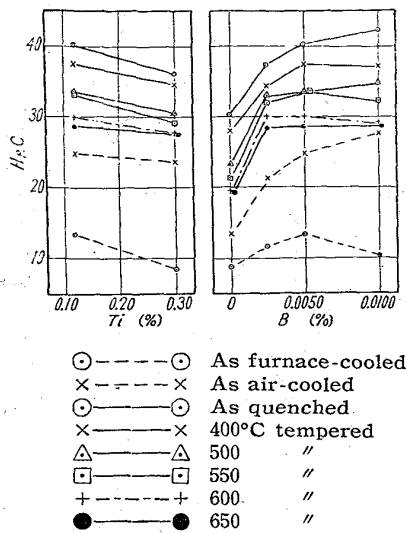


Fig. 6. Effect of titanium and boron on hardness of Mn-Si-Mo steel.

し状態とも、伸びの場合とほとんど同様な傾向を示している。

Fig. 6 は Ti および B 量の硬さにおよぼす影響を示したものである。Fig. 5, 6 より Ti を 0.13% 含有する場合、焼なまし状態における硬さ、引張強さにおよぼす添加 B 量の影響をみれば、B 量の増加とともに若干増大して 0.0050% B のとき最高となり、これ以上の B を添加すれば逆に減少し、0.0100% では B を全く添加しないものと比較して硬さ、引張強さにほとんど差が認められなくなる。しかし、焼ならし状態では、添加 B 量の多いほど硬さ、引張強さは高い値を示すが、0.0050 および 0.0100% 添加における差異は僅少である。さらに焼入れ焼戻し状態では、添加 B 量の増加にともない硬さ、引張強さはいちじるしく増大するが、焼戻し温度の高くなるにしたがって 0.0025, 0.0050 および 0.0100% 添加の場合の差異は減少し、三者間にほとんど差が認められなくなる。逆に伸び、絞りには焼なまし、焼ならしおよび焼入れ焼戻し状態とも B 添加量の増加につれて減少するが、硬さ、引張強さの場合と同様、0.0025% B 以上ではその差は少ない。したがって、本系鋼を 500°C 以上に焼戻して使用する場合には、B を 0.0025~0.0050% 添加すればほぼ十分その効果を期待することができよう。

他方、B を 0.0050% 添加した場合、0.1~0.3% の Ti を含有すると、Ti 量の増加とともに焼なまし、焼ならしおよび焼入れ焼戻し状態における硬さ、引張強さは減少し、伸び、絞りに対してはほとんど影響をおよぼさない。すなわち、本系鋼においても Ti は脱酸、脱窒用として少量添加すべきである。

なお本系鋼の顕微鏡組織は、焼なまし状態では、各鋼とも大部分をフェライトがしめ極く少量のパーライトが点在する組織を示すが、焼ならし状態のパーライトはその量を増すとともにソルバイト状を呈している。また焼入れ焼戻し状態では、いずれの場合も焼戻しソルバイト状中間段階組織である。

(4) 焼入性におよぼす Ti, B の影響

熱間伸延した 35mm φ 丸棒を 920°C × 60mn 加熱空冷の焼ならし処理後、JIS G0561 (1956) の規定にしたがい所定寸法に切削したジョミニー一端焼入れ試験片を 910°C × 20mn 加熱後一端水冷したときの各系鋼のジョミニー曲線を Fig. 7, 8 および 9 に示す。

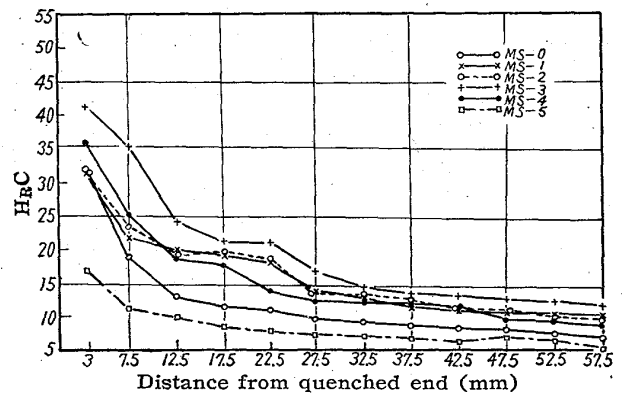


Fig. 7. Jominy curves of Mn-Si steel.

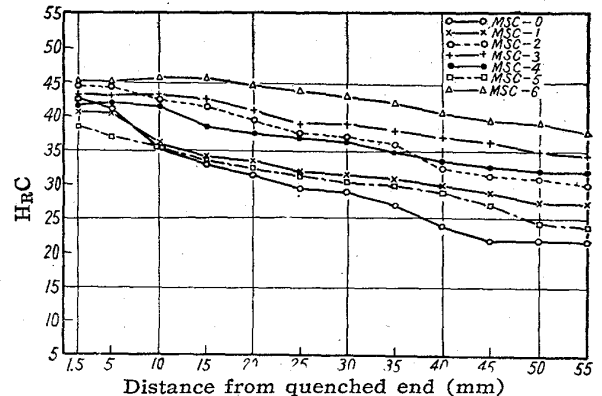


Fig. 8. Jominy curves of Mn-Si-Cr steel.

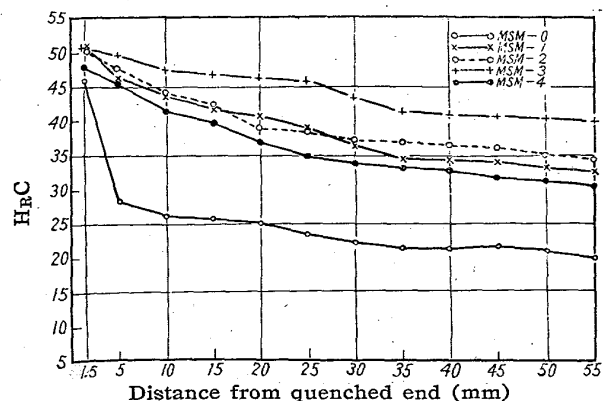


Fig. 9. Jominy curves of Mn-Si-Mo steel.

まず Mn-Si 系で B を添加していない MS-0 と 0.0025% B を添加した MS-1 とを比較すれば、B 添加により焼入性は若干増大しているが、両鋼の Ti 含有量に若干の差があるため B のみの効果とは考えられない。Ti を 0.3% 含有する場合 0.0025~0.0100% の B を添加すれば、0.0025 および 0.0050% 添加時には両者にほとんど差が認められないが、0.0100% B の添加により焼入性は相当向上する。また B を 0.0050% 添加したとき、0.2~0.3% Ti を含有せしめると、Ti 量の増加にともない焼入性はわずかに減少することが認められる。

Mn-Si-Cr 系では、Ti が 0.3% 存在する場合、B を 0~0.0100% の範囲で添加すれば、B 量の増加とともに焼入性は増大するが、0.0050% B 添加のとき最大となり 0.0100% では 0.0025% の場合よりも低くなる傾向を示す。また B 添加量が 0.0050% で Ti を 0.1~0.55% まで含有せしめると Ti 量の増加により焼入性の劣化することが認められた。

次に Mn-Si-Mo 系では B 添加の効果がきわめて顕著に現われている。すなわち、添加 B 量の増すにつれて焼入性は増大し、0.0025 および 0.0050% では差異がほとんどないが、0.0100% で特に優れた焼入性を示している。しかしながら、0.007% 以上の B は赤熱脆性を示す¹¹⁾といわれており、かつ前述の機械的性質におよぼす B の影響を考慮することによりさらに調査して、鋼の使用目的に応じて B 添加量の上限を定めるべきである。

IV. 総 括

以上 Mn-Si 系、Mn-Si-Cr 系および Mn-Si-Mo 系高抗張力鋼におよぼす Ti、B の影響について若干の検討を加えたが、これを要約すれば次のとおりである。

(1) Mn-Si 系で Ti を 0.3% 含有すると、B は焼ならしおよび 600°C 以上の焼戻し状態における硬さ、引張強さおよび降伏点を若干増加させ、絞りを減少させるが、伸びの低下はわずかである。

(2) Mn-Si-Cr 系で Ti が 0.3% 存在するとき、機械的性質におよぼす B 添加の効果はほとんど認められない。

(3) Mn-Si-Mo 系で Ti を 0.13% 含有すると、0.0025~0.0050% の B は硬さおよび引張強さをいちじるしく増大させ、伸び、絞りの低下もわずかで、B 添加の効果を極めて明白に示す。この傾向は焼戻し状態において特に顕著で、HT100 級の調質用高抗張力鋼として有望である。

(4) Ti は脱酸、脱窒剤として少量添加すべきで、機械的性質におよぼす影響からすれば、Ti 含有量を Mn-Si 系では 0.3% 以下に、また Mn-Si-Cr 系および Mn-Si-Mo 系では少なくとも 0.1% 程度の含有量に抑えるべきであるが、焼入性という面からみれば、各系鋼とも 0.1% 以下を添加すべきである。

(5) B は各系鋼の焼入性を向上させ、Mn-Si-Cr 系では 0.0050%、Mn-Si 系および Mn-Si-Mo 系では 0.0100% 添加の際に最大の焼入性を示す。

(昭和37年6月寄稿)

文 献

- 1) 浅野栄一郎, 他: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 585~591
- 2) R. W. GURRY: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 158 (1944), p. 98~106
- 3) G. DERGE: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 167 (1946), p. 93~110
- 4) M. C. UDY et al: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 172 (1947), p. 273~302
- 5) D. L. McBRIDE: Proc. Open-Hearth Conf., Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 35 (1952), p. 118~128
- 6) E. H. BERRY, JR: Proc. Elec. Furn. Steel Conf., Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 9 (1951), p. 60~64
- 7) T. G. DIGGES et al: B. of St'd, J. Research, 39 (1947), p. 67~131
- 8) T. G. Digges et al: Trans. Amer. Soc. Metals, 40 (1948), p. 1124~1146
- 9) G. E. SPEIGHT: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 166 (1950), p. 196~198
- 10) W. TOFAUTE et al: Arch. Eisenhüttenwes., 12 (1938), p. 33~37
- 11) L. J. ROHL: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 176 (1954), p. 173~187