論 説

UDC 669.14.018.298:539.4:669.014.6:621.771.016.2.011

0.3 %C-0.5 %Mn 鋼の機械的性質に及ぼす
合金元素ならびに圧延加熱温度の影響

高 田 勝 典*

Effects of Alloying Elements and Preheating
Temperature for Rolling on the Mechanical Properties
of 0.3%C-0.5%Mn Base Steels

Katsunori Takada

Synopsis

After investigation of the effect of hot-working and alloying elements on the mechanical properties of 0.3%C-0.5%Mn base steels, the following results were obtained.

- (1) The hardness decreased and the value of elongation increased by hot-working for almost every steels.
- (2) The hardness depended upon volume fraction of ferrite, which is mainly influenced by austenite grain size and recrystallization ratio after hot-working.
- (3) The effect of alloying elements on recrystallization during hot-working was clarified.

1. 緒 言

熱間圧延した機械構造用鋼は、伸線などの二次加工や、切削加工、冷間鍛造などの部品加工を行う前に、焼ならしや焼なましなどの熱処理を行うことが多い。しかし熱間圧延条件および圧延後の冷却条件を適宜コントロールすることにより、圧延後の前記のような熱処理を省略できるばかりでなく、鋼材の品質改善が期待できる。従来、制御圧延・制御冷却技術は非調質型高抗張力鋼板の製造に対して開発および実用化されているが、炭素含有量の高い機械構造用鋼についての研究は比較的少ない^{1), 2)}。筆者は 0.3%C 鋼をベースにとりあ

げ、その機械的性質に及ぼす合金元素と熱間加工の影響について調べたので報告する。

2. 実 験 方 法

2.1 供 試 材

供試材は Table 1 に示す化学成分を有する鋼をベースとし、Si, Mn, Ni, Cr を約 1.4 at% まで 1 水準または 2 水準単独添加、Mo については 0.7 at% 単独添加したものであり、また Al, Nb, Ti, V については 0.25 at% まで 1 水準または 2 水準単独添加したものである。これらの鋼を高周波誘導炉で 30 kg 鋼塊とし、25mm 角に鍛造して熱間加工用供試材とした。

2.2. 熱間圧延実験

供試材を Fig. 1 に示す A, B 試験片に加工し、同図に示す様式で加熱を行った後、試験片 A につ

昭和56年12月28日 受付

*大同特殊鋼(株)研究開発本部中央研究所

Table 1. Chemical composition of steels.

(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.30	0.20	0.50	0.016	0.015	0.08	0.08	0.10	0.05

Si, Mn, Ni, Cr, Mo, Al, Nb, Ti, V: vari.

Fig. 1. Experimental method.

いては圧延を施さずに水冷と空冷処理を施し、試験片Bについては1パスで10mmの板厚にした後水冷と空冷処理を施した。使用した圧延機のロール径は230mm、回転速度は36rpmであり、この時の歪速度は約 10 sec^{-1} である。加熱温度としてはオーステナイト結晶粒が粗大化する1150℃と比較的細粒の900℃の2水準を選んだ。圧延温度は機械的性質が著しく変化する温度¹⁾800℃一定とした。

試験片Aおよび試験片Bで加熱または圧延後水冷した試料についてはオーステナイトの再結晶、部分再結晶、未再結晶の判定、と粒度測定を行った。一方、試験片Aおよび試験片Bの加熱または圧延後空冷した試料については、圧延方向より引張り試験片を採取するとともに硬さを測定した。また機械的性質に及ぼす熱間加工の影響を考察するために、ミクロ組織の観察も行った。なお空冷材の冷却速度は800~500℃の間で約 $1.5^\circ\text{C}/\text{sec}$ であった。

Fig. 2. Effect of alloying elements and hot rolling on hardness (HV) and elongation (δ) (900°C).

3. 実験結果

3.1 機械的性質に及ぼす合金元素と熱間加工の影響 (加熱温度; 900℃)

圧延前加熱温度900℃の場合の、硬さと伸びに及ぼす合金元素と熱間加工の影響について Fig. 2 と Fig. 3 に示す。なお、図中 def. は加工を施した場合、non def. は加工のない場合である。引張り強さと硬さの間には直線関係が認められたので硬さで整理し、一方延性の代表値として伸びを採用した。また横軸は合金元素の影響を明確にするために変化させた合金元素のベース鋼との差で整理した。炭窒化物形成傾向の小さい元素において、加工のない場合、硬さへの影響は Mo が最も大きく、ついで Mn, Cr であり、Ni, Si の影響はほとんど認められない。熱間加工を行った場合についても、この順位は変化しない。また熱間加工を行

Fig. 3. Effect of alloying elements and hot rolling on hardness (HV) and elongation (δ) (900°C).

Fig. 4. Effect of alloying elements and hot rolling on hardness (HV) and elongation (δ) (1150°C).

うことにより、いずれの場合も硬さは下がるが、硬さの低下する量は加工のない状態での硬さが高いもの程大きい。伸びに及ぼす合金元素と熱間加工の影響は、硬さの場合とほとんど逆であり、Moが最も伸びを低下させ、また熱間加工によりいずれの場合も伸びは向上する。

炭窒化物形成傾向の大きいAl, Nb, Ti, Vでは、硬さに対してVの影響が最も大きく、Nb, Ti, Alの影響はほとんど認められない。加工を行った場合についても同様の傾向が認められる。また熱間加工の影響については、炭化物形成傾向の小さい元素の場合と同様の傾向が認められた。

3.2 機械的性質に及ぼす合金元素と熱間加工の影響 (加熱温度; 1150°C)

圧延前加熱温度 1150°C の場合、硬さと伸びに及ぼす合金元素と熱間加工の影響について Fig. 4 と Fig. 5 に示す。Fig. 4 は炭窒化物形成傾向の小さい元素について、Fig. 5 は炭窒化物形成傾向が大きい元素についてまとめた結果である。炭窒化物形成傾向の小さい元素において、加工を行わない場合、硬さへの影響は Mo が最も大きく、ついで Cr, Mn の順であり、Ni, Si の影響はほとんど認められない。加熱温度 900°C の場合と比較すると Cr の影響が著しく大きくなっている。熱間

Fig. 5. Effect of alloying elements and hot rolling on hardness (HV) and elongation (δ) (1150°C).

加工を行った場合には、Cr と Mn の影響がほぼ同等となるのみで他の合金元素の順位は変わらない。また熱間加工を行うことにより、Mo を添加した鋼の場合は硬さは上がるが、それ以外の合金元素

については硬さは低下する。熱間加工により硬さの低下する量は、加熱温度 900℃ の場合に比べ著しく大きい。例えば、1.3 at % Cr の場合、熱間加工による硬さの低下量は 900℃ 加熱においては約 HV 20 であるが、1150℃ 加熱では約 HV 60 低下する。伸びに及ぼす合金元素と熱間加工の影響は、900℃ 加熱の場合とほぼ同様である。

炭窒化物形成傾向の大きい Al, Nb, Ti, V について、900℃ 加熱と異なるのは特に Ti, Nb の影響であり、900℃ 加熱でのこれらの元素の硬さに対する影響はほとんど認められなかったが、1150℃ 加熱では熱間加工の有無を問わず、HV 20 程度硬さを高めるのが認められた。

4. 考 察

これらの結果を考察するために、マイクロ組織およびオーステナイト結晶粒の状態について調査した。

4.1 ミクロ組織観察結果

熱間加工を行った場合と行わない場合の空冷し

た試料の代表的マイクロ組織について、900℃ 加熱の場合を **Photo. 1** および **Photo. 2** に、また 1150℃ 加熱の場合を **Photo. 3** および **Photo. 4** に示す。900℃ 加熱において、Mo を添加した鋼の熱間加工を行わない状態でのマイクロ組織は大部分がベイナイトより成っているが、熱間加工を行うことによりフェライトとベイナイト組織となる。他の合金元素を含む鋼においては、熱間加工の有無を問わずフェライトとパーライト組織より成っているが、いずれの場合も熱間加工により組織が微細化すると同時に、フェライト量が著しく増加していることが認められる。さらに熱間加工後のマイクロ組織には、いずれについても未再結晶オーステナイトから変態が生じた痕跡は認められなかった。1150℃ 加熱において、Mo を添加した鋼のマイクロ組織は熱間加工の有無を問わずベイナイトより成っているが、熱間加工材には未再結晶オーステナイトより変態が生じた痕跡が認められる。すなわち熱間加工により導入された歪が十分解放されない状態にあるために、加工を行わない場合に比べ加工後

Steel	Base	Mn (1.4 at%)	Cr (1.4 at%)
Non deformed			
	HV 150	198	207
Deformed			
	HV 147	188	189

Photo. 1. Microstructure of steels (900℃).

40μm

Steel	Mo (0.7 at%)	Al (0.27 at%)	Nb (0.02 at%)
Non deformed
HV	267	159	149
Deformed
HV	241	151	151

Photo. 2. Microstructure of steels (900°C).

40μm

Steel	Base	Mn (1.4 at%)	Cr (1.4at%)
Non deformed
HV	160	213	267
Deformed
HV	146	191	217

Photo. 3. Microstructure of steels (1150°C).

40μm

の硬さが高くなったものと推察される。Cr を添加した鋼の加工を行わない状態でのマイクロ組織は、900℃加熱の場合と異なり大部分がベイナイトより成っているが、加工を行うとフェライトとパーライト組織となる。このマイクロ組織の変化が硬さの著しい低下をもたらしたものと推察される。他の合金元素を含む鋼においては、熱間加工の有無を問わずフェライトとパーライト組織より成っているが、900℃加熱の場合と同様に熱間加工により組織が微細化すると同時にフェライト量が著しく増加している。1150℃加熱におけるこの組織変化は900℃加熱の場合に比べ著しい。これらのマイクロ組織の変化により、900℃および1150℃加熱における加工前後の硬さの変化は定性的に説明される。

4.2 硬さに及ぼすフェライト量の影響

マイクロ組織の観察から、熱間加工により、熱間加工を行わなかった場合にベイナイト組織であったものが、フェライトとベイナイト組織またはフェライトとパーライト組織に変化する場合と、粗いフェライトとパーライト組織であったものが、

熱間加工により微細なフェライトとパーライト組織へ変化する2通りに大別されることがわかった。後者の変化においては特にフェライト量の増加が著しい。そこで相対フェライト量を線分法により求め硬さについて整理した結果を Fig. 6 に示す。なお伸びは硬さと逆相関の関係が認められたので硬さのみ注目して整理した。図中炭窒化物形成傾向の大きい元素については加熱冷却時での固溶析出の問題があるので記号を区別して整理した。炭窒化物形成傾向の小さい Si, Mn, Ni, Cr については加熱温度、加工の有無の影響はなくフェライト量で硬さが整理でき、フェライト量が増加すると硬さは低下する。これは従来の知見とよい一致を示す³⁾。また同一フェライト量の場合、硬さに及ぼす合金元素の影響は、Mn, Cr, Ni ≈ Si の順で小さくなる。炭窒化物形成傾向の大きい元素のうち Al と V については、加熱温度の影響はほとんど認められず、ほぼフェライト量で整理されるが、Nb, Ti については加熱温度の影響が認められ1150℃加熱の場合の硬さがいずれも高い。これは Nb (C, N), Ti (C, N) の析出硬化の影響によるも

Fig. 6. Relation between hardness (HV) and volume fraction of ferrite (f_F) in steels.

Fig. 7. Relation between volume fraction of ferrite (f_F) and austenite grain size No. in steels.

のと考えられる⁴⁾。

4.3 フェライト量に及ぼすオーステナイト粒度の影響

鋼の組成および冷却速度が一定のもとで、冷却変態後のフェライト量を支配する主要因として変態前のオーステナイト結晶粒度があげられる。水冷材を用いて求めたオーステナイト粒度でフェライト量を整理した結果を Fig. 7 に示す。図はオーステナイト粒度測定が容易なものについてのみ整理した結果である。合金元素により差はあるが、フェライト量とオーステナイト粒度の間にはほぼ直線関係が認められる。熱間加工後のオーステナイトが部分再結晶および未再結晶状態を示したものはこの直線関係より上方にずれているが、前出のミクロ組織において、未再結晶オーステナイトより変態が生じた痕跡が認められないことより、圧延後変態に到る冷却過程において再結晶が進行したものと推察される。

4.4 熱間加工時の再結晶に及ぼす合金元素の影響

機械的性質に対し熱間加工後のオーステナイト結晶粒の状態の影響が大きいことがわかった。この意味でも熱間加工時の再結晶挙動に及ぼす合金元素の影響を知ることは重要である。熱間加工時の再結晶挙動に及ぼす合金元素の影響を調べた結

Fig. 8. Effect of initial austenite grain size and alloying elements on recrystallization.

果を Fig. 8 に示す。再結晶挙動に対しては初期オーステナイト粒度が影響するので⁵⁾、これを考慮して図の縦軸には初期オーステナイト粒度をとった。また 900°C 加熱の場合は、熱間加工後いずれも再結晶オーステナイトを示していたので図から

省いてある。Ni, Crは熱間加工時の再結晶に対する影響は大きくないが、Moはこれを著しく阻害することがわかる。さらにVおよび少量のNbは再結晶を阻害するが多量のNb, Tiは再結晶に対しあまり大きな影響を及ぼさないことがわかる。

5. 結 言

0.3% C-0.5% Mn 鋼をベースとし、機械的性質に及ぼす合金元素と熱間加工の影響を調査し下記の結果を得た。

(1)ほとんどの鋼において、熱間加工を行うことにより硬さは低下し、延性は向上する。

(2)硬さはフェライト量と強い相関があり、フェライト量は加工後のオーステナイト結晶粒の状態(大きさ、再結晶率)に大きく影響される。

(3)Ni, Crは熱間加工時の再結晶に大きな影響を与えないが、Mo, Vおよび少量のNbは再結晶を阻害する。一方、多量のNb, Tiの影響は小さい。

(文 献)

- 1) 大宝, 高田: 電気製鋼, 52 (1981) 3, 158
- 2) 井上: 鉄鋼基礎共同研究会高温変形部会シンポジウム, (1980), 102
- 3) R. G. Davies: Met. Trans., 9A (1978) 3, 451
- 4) K. J. Irvine: JISI, 186 (1957), 54
- 5) 田中: 鉄鋼基礎共同研究会高温変形部会シンポジウム, (1979), 55