論 説

UDC 669.14.018.291.621.7.016.2.011:548.53:539.4.011

機械構造用鋼の再結晶挙動および機械的性質 に及ぼす熱間加工条件の影響

大宝 雄蔵*, 高田 勝典**

Effect of Hot-Working Conditions on Recrystallization Behavior and Mechanical Properties of Machine Structural Alloy Steels

Yuzo Ohtakara and Katsunori Takada

Synopsis

After investigation of the effects of hot-working conditions on recrystallization behavior and mechanical properties of S40C, SCM 435, SCM 420 and SCM 420 + Nb steels the following results were obtained.

- (1) Recrystallizations during hot-working occurred in the order of easiness S40C, SCM 435, SCM 420 and SCM 420 + Nb steels.
- (2) The value of reduction in area in the tension test can be improved by hot-working the austenite with fine grains at temperature of 750 to 800°C in steels but S40C.
- (3) The result of (2) was discussed in terms of the effects of hot-working on the cooling transformation of the steels.

1. 結 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。熱間圧延条件および圧延後の冷却条件を最適にコントロールすれば、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、制御圧延技術は非調質型高抗張力鋼板の製造に実用化されているが

機械構造用鋼については研究が比較的少ない。筆者らは炭素鋼、強靱鋼および肌焼鋼を取り上げ、それらの熱間加工時の再結晶挙動ならびに熱間加工後の機械的性質に及ぼす熱間加工条件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炭素鋼 (S40C)、強靱鋼 (SCM435) および肌焼鋼 (SCM 420 および微量 Nb を添加した SCM 420) の 4 種である。ピレットより切出した素材を鍛造して熱間圧延実験用供試材とした。

2.2 熱 間 圧 延 実 験

昭和56年 5月25日 受付

*大同特殊鋼㈱研究開発本部中央研究所, 工博

**大同特殊鋼㈱研究開発本部中央研究所

Table 1. Chemical composition of experimental steels.

(wt%)

Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb
S 40C	0.41	0.25	0.76	0.024	0.030	0.01	0.02	0.11	—	—
S CM435	0.34	0.25	0.67	0.016	0.030	0.15	0.10	0.95	0.15	—
S CM420	0.19	0.24	0.75	0.013	0.029	0.14	0.08	1.01	0.16	—
S CM420+N b	0.18	0.25	0.78	0.011	0.014	0.13	0.05	1.01	0.15	0.038

Fig. 1. Experimental method.

供試材を Fig. 1 に示す階段状試験片に機械加工し、同図に示す様式で加熱を行った後、1パスで厚さ 10mm の板に圧延した。このとき 1 回の圧延で 17, 33, 50 および 67% の圧下率が試験片の各部で得られる。使用した圧延機のロール径は 230 mm、回転速度は 36rpm である。このとき歪速度は $5 \sim 10 \text{ sec}^{-1}$ である。加熱温度としてはオーステナイトが粗大化する 1150°C と比較的細粒の 950°C の 2 水準を選んだ。圧延温度は 750°C から 1050°C までを 50°C 間隔にとった。

4 階段を有する試験片は圧延後直ちに水冷し、マイクロ組織から再結晶挙動を調べた。また 1 階段の試験は板厚 20mm から 10mm へ 1 パスで圧延後、空冷し圧延方向より引張試験片を機械加工した。またマイクロ組織の観察も行い、冷却変態組織に及ぼす熱間加工条件の影響を調べた。なお、空冷材の冷却速度は 800~500°C の間で約 1.5°C/sec であった。

Fig. 2. Effect of rolling reduction and temperature on the recrystallization in S40C.

3. 実験結果と考察

3.1 オーステナイトの再結晶挙動

圧延後急冷した試料のマイクロ組織を観察し、未再結晶 (UR)、部分再結晶 (PR) および再結晶 (R) の判定を行った。圧延温度と圧下率がこれらの再結晶挙動に及ぼす影響を S40C および SCM 420 を例にそれぞれ Fig. 2 および Fig. 3 に示す。圧延前のオーステナイト粒度は S40C の 1150°C 加熱および 950°C 加熱でそれぞれ ASTM No. 0.6 および 6.8 であり、SCM 420 ではそれぞれ 1.8 および 6.8 である。図中の曲線は再結晶と部分再結晶の境界 (R/PR 境界) の圧延温度および圧下率の条件を示す。

Fig. 3. Effect of rolling reduction and temperature on the recrystallization in SCM420.

S40C では加熱温度が950°Cの場合 R/PR 境界線は、1150°C加熱の場合よりも約150°C低温側にある。50%圧下のとき R/PR 境界温度は950°C加熱の場合には725°Cである。SCM 420 では950°C加熱のとき R/PR境界温度は50%圧下に対して850°Cであり、S40C よりも125°Cだけ高くなっている。また1150°C加熱のときより境界温度は75~100°Cだけ低くなっている。

再結晶挙動に対する加熱温度の影響は初期オーステナイト粒度という因子を通じて作用すると考えることができる¹⁾。

各鋼種の R/PR 境界圧延温度を圧延前のオーステナイト結晶粒度の関数として整理して Fig. 4 に示す。ここでは、圧下率50%における R/PR 境界温度をとりあげた。図には SCM 435 と SCM 420 + Nb 鋼における結果も並記した。図において、同一の初期オーステナイト粒度、例えば粒度4の場合の各鋼種の R/PR 境界温度を比較すると S40C が最も低く約800°Cであり、SCM 435, SCM 420 の順に高く、SCM 420 + Nb が最も高く約950°Cである。オーステナイトの再結晶挙動に及ぼす炭素の影響はほとんどないと考えられるので²⁾, S40C と SCM 435 および SCM 420 との、R/PR 境界温度の差は特に Mo および Cr の固溶元素によってもたらされたものと考えられる。また Nb の再結晶抑制効果がこれらの固溶元素の効果よりも大きいことがわかる。

Fig. 4. Effect of initial grain size on the R/PR boundary in several steels (reduction 50%).

Fig. 5. Effect of rolling temperature on the tensile properties in S40C (reduction 50%).

3.2 機械的性質に及ぼす圧延条件の影響

1パスで50%の圧下率を加え板厚10mmにした後空冷した試料の機械的性質に及ぼす圧延前加熱温度と圧延温度の影響を各鋼種について Fig. 5 ~ 8 に示す。S40C (Fig. 5) においては、加熱温度と圧延温度を変化させても機械的性質はほとんど変

化しないが、SCM 435、SCM 420 および SCM 420 + Nb 鋼においては加熱温度および圧延温度に複雑に依存している。すなわち、1150℃加熱の

Fig. 6. Effect of rolling temperature on the tensile properties in SCM435 (reduction 50%).

Fig. 7. Effect of rolling temperature on the tensile properties in SCM420 (reduction 50%).

場合には、圧延温度の低下に伴い0.2%耐力と絞り
は低下し、逆に引張り強さは少し高くなる。しか
し950℃加熱の場合には、1150℃加熱の場合とは逆
に、圧延温度が低下すると0.2%耐力と絞りは高く
なり、引張り強さは下がる。伸びの変化は絞りと同
じ傾向を示す。圧延後空冷した試料の代表的ミ
クロ組織を **Photo. 1** に S40C および SCM 435 に
ついて、**Photo. 2** に SCM 420 および SCM 420 +
Nb鋼について示す。S40Cでは、いずれの場合もフ
ェライトとパーライトの組織である。SCM 420 お
よび SCM 420 + Nb 鋼においては、絞りが著しく
向上した圧延温度に対するマイクロ組織はフェライ
トとパーライトから成り、それ以外の場合はベイ
ナイトおよび少量のマルテンサイトの硬化組織が
共存していた。また引張り試験において、これら
の硬化組織が存在する場合には降伏点がなく、一
方フェライトとパーライトのみの場合には、いず
れの鋼種においても降伏点が認められた。

3.3 冷却変態特性に及ぼす熱間加工条件の影響

鋼のオーステナイト粒度が変態特性に大きく影
響することはよく知られている^{3), 4)}。3.1では再結
晶の有無と熱間加工条件との関係を調べた。ここ

Fig. 8. Effect of rolling temperature on the tensile properties in SCM420+Nb (reduction 50%).

Steel	S40C		SCM435	
Heating temp. 1150°C
Roll. temp.	900°C	800°C	950°C	850°C
Heating temp. 950°C
Roll. temp.	850°C	700°C	900°C	800°C

Photo. 1. Microstructures of hot rolled steels.

40μm

では再結晶粒度を問題にとりあげ、この粒度がどのように圧延後の変態挙動に影響しているかを考えたい。

熱間圧延後の急冷で再結晶が認められた領域（R領域）では、その再結晶粒度は圧延温度にはあまり支配されないが圧延の初期加熱温度には強く依存する。すなわち、熱間加工前の粒度の影響を強く受ける。SCM 435 において圧下率が50%の場合、1150°C加熱時の初期粒度1.5からR領域では5.8の粒度に再結晶し、950°C加熱時の初期粒度4.8からR領域で9.5の粒度に再結晶する。このように再結晶粒度は初期加熱温度によって大きく変っている。

通常の連続冷却変態に及ぼすオーステナイト粒度の影響を SCM 435 について調べてみた。変態前の粒度を変えるために、1150°Cおよび850°Cに加熱し、それぞれ3.3および10.3のオーステナイト粒度を得た。SCM 435 の A_{e3} 変態点は約750°Cであ

Fig. 9. Effect of austenite grain size on the CCT curves upon reheating in SCM435.

るので750°C以下の経過時間を横軸にとって連続冷却変態曲線を求めた結果を Fig. 9 に示す。同図に示す冷却曲線は圧延実験材の空冷に対するものである。同図よりオーステナイト結晶粒が微細になるとフェライト、パーライト変態開始曲線は高

Steel	SCM420		SCM420 + Nb	
Heating temp. 1150°C
Roll. temp.	950°C	850°C	1000°C	900°C
Heating temp. 950°C
Roll. temp.	900°C	800°C	900°C	800°C

Photo. 2. Microstructures of hot rolled steels.

40μm

温および短時間側に移行し、さらにベイナイト変態開始曲線も短時間側に移行することがわかる。これを厚さ 10mm の圧延実験試片の冷却曲線と対比してみると、変態前のオーステナイト結晶粒が微細になるとパーライト組織がでやすくなるとともにベイナイト量が少なくなることが予想される。また、Photo. 1 に示した SCM 435 の再結晶域で圧延後空冷した場合のマイクロ組織は圧延後のオーステナイト粒度が 5.8 (1150°C 加熱 950°C 圧延) の時にはフェライトとベイナイトであり、一方 9.5 (950°C 加熱 900°C 圧延) の場合にはフェライト、パーライトおよびベイナイトの混在した組織であり、Fig. 9 の結果と対応する。このように再結晶域圧延後のマイクロ組織は通常の連続冷却変態曲線 (再加熱による) のオーステナイト粒度依存性により、説明することができる。

つぎに部分再結晶領域で加工した時の SCM 435 のマイクロ組織の変化について考察する。

1150°C で加熱後 850°C の部分再結晶温度で圧延した時のマイクロ組織は粗大なベイナイトと比較的微細なフェライトが混在しているが、950°C で加熱後 800°C の部分再結晶温度で圧延した時のマイクロ組織は均一微細なフェライトとパーライト組織である。また 1150°C 加熱の場合には未再結晶オーステナイトから変態が生じた痕跡が認められるが、950°C 加熱ではそのような痕跡は認められず再結晶オーステナイト粒から変態が生じたものと考えられる。すなわち加工前のオーステナイト粒が粗大な場合には部分再結晶域で加工されて生じた未再結晶オーステナイトは加工後の変態に至る冷却過程でほとんど再結晶が進行せず、他方加工前のオーステナイト粒が微細な場合には部分再結晶域で加工されて生じた未再結晶オーステナイトは加工後変態に至る冷却過程で再結晶が進行したことを物語るものである。また圧延温度が低下するに従って再結晶オーステナイト粒が微細になる傾向

がある⁵⁾ことと考え合せると、冷却過程に生じた再結晶粒は極微細となりフェライトおよびパーライト変態が促進され、その結果 Fig. 9 におけるベイナイト変態完了曲線がさらに短時間側に移行しフェライトとパーライトのみの組織が得られたものと考えられる。

SCM 420 および SCM 420 + Nb 鋼についても、マイクロ組織より判断すると、SCM 435 と同様の連続冷却変態曲線のオーステナイト粒度依存性が類推される。

3.4 絞りに及ぼすベイナイト体積率の影響

部分再結晶および未再結晶オーステナイトより変態が生じた痕跡のないマイクロ組織を有する試料の引張試験での絞りに対するベイナイト（一部微量のマルテンサイトを含む）体積率の影響を Fig. 10 に示す。図でベイナイト以外の残部の組織はフェライトとパーライトである。この他にベイナイト平均粒径、フェライト体積率およびフェライト平均粒径と絞りの関係も調べたが、いずれの場合もはっきりした傾向が認められなかった。荒木らは⁶⁾SS34 および SS41 をベースとしこれに Mo または Cr を添加したフェライト・パーライト鋼においてベイナイトなどの低温変態生成物が存在する場合に絞りが Fig. 10 と同様の傾向を示すことを見い出している。また岡林らは⁷⁾ベイナイトとマルテンサイトの二相混合組織よりなる 0.42% C-Ni-Cr-Mo 鋼においてもマルテンサイト体積率と絞りの関係が図と同様の傾向を示すことを報

告している。これらのことより今回の実験における絞りはベイナイト（一部微量のマルテンサイトを含む）などの硬化組織の体積率により主として支配されるものと考えられる。

4. 結 論

炭素鋼、強靱鋼および肌焼鋼の代表的鋼種である S40C, SCM 435, SCM 420 および SCM 420 + Nb 鋼の再結晶挙動ならびに熱間加工後の機械的性質に及ぼす熱間加工条件の影響について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 熱間加工の条件（加熱温度、加工温度、および加工度）が再結晶挙動に及ぼす影響を調べ再結晶のしやすさは S40C, SCM 435, SCM 420, SCM 420 + Nb 鋼の順であることがわかった。
- (2) 加工前の初期オーステナイト粒度を細かくし、800~750℃の部分再結晶温度領域で圧延し空冷（10mm 厚の板材）することにより SCM 435, SCM 420 および SCM 420 + Nb 鋼の引張試験の絞り値を向上させることができる。
- (3) (2)の理由として、変態前のオーステナイト粒が微細になることによりフェライトおよびパーライト変態が促進され、ベイナイト組織が消失したことによると考えた。さらに引張り試験において、これらの硬化組織が存在しない場合には降伏点が認められる。

(文 献)

- 1) 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
- 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) 町田，勝，梶：鉄と鋼，66 (1980) 4，S 597
- 4) C.M. Sellars and J.A. Whiteman：Metal Science，(1979)，187
- 5) I.Kozasu, C.Ouchi, T.Sampe and T.Okita：Proceedings of Microalloying '75, Union Carbide Corp., New York, (1975)，120
- 6) 青木，金尾，荒木：鉄と鋼，54 (1968) 4，433
- 7) 富田，宮本，岡林：鉄と鋼，64 (1978) 9，1379

Fig. 10. Relation between reduction of area and volume fraction of bainite in SCM420 and SCM435.