

つた。

(1) 少量のNbは低合金鋼のオーステナイト粗大化防止に有効である。

(2) Nbは1200°Cでオーステナイトに固溶し、油冷または空冷後、525°C以上に焼もどすと顕著な二次硬化を生ずる。このため鋼の強度は上昇するが、延性ならびに靱性は低下する。

(3) Nbの二次硬化は、高温長時間強度にはとくに有利なようである。

文 献

- 1) 鈴木, 金田, 新名, 梶: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 2014
- 2) 鈴木, 金田, 新名, 梶: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 1076

(161) Cr-Mo鋼のMs付近におけるベイナイト変態について

金属材料技術研究所

○中島 宏興・工博 荒木 透

Bainite Transformation of Cr-Mo Steel in Temperature Range Near Ms.

Hirooki NAKAJIMA and Dr. Tōru ARAKI.

1. 緒 言

ベイナイト変態は約350°Cを境にして上部ベイナイト変態と下部ベイナイト変態でそのkineticsに相異のあることが報告されている^{1)~3)}。Ms温度以下ではベイナイト変態がマルテンサイトによつて促進される⁴⁾ことは知られているが、定量的な研究は少なくそのkineticsについても不明な点が多い。

また、オーステンパーやマルテンパー処理によつてえられたベイナイトは、一般に焼もどしマルテンサイトよりも靱性がすぐれているとされている⁵⁾が、その原因など未解決な点が多い。

これらの問題を解明するために、まず0.5% CのCr-Mo鋼を用いMs付近のベイナイト変態について調べ、そのnose付近における恒温変態によつて得られたいろいろな混合割合の焼もどしマルテンサイトとベイナイトについて機械的性質を比較した。

2. 実験試料および方法

工業用のCr-Mo鋼(SCM 22)を母材とし再溶解によつて0.5% Cに加炭して供試材とした。その化学組成をTable 1に示す。

MsおよびMs以下におけるマルテンサイト量の測定は、(1) GRENINGER-TROIANOの組織法⁶⁾(2)熱膨張測定とX線測定、の2方法によつて行なつた。

恒温変態図は主に熱膨張計測定によつて作成した。試験片の寸法は2mmφ×30mm lである。

Table 1. Chemical composition of sample. (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
0.50	0.20	0.62	0.010	0.010	0.99	0.21	0.03	0.15

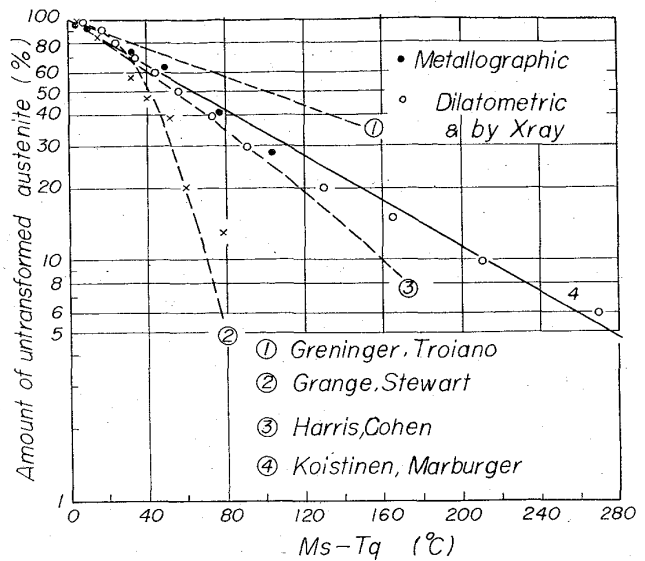


Fig. 1. The amount of untransformed austenite as a function of the difference between Ms and Tq reached during quenching.

引張試験はTOM 5000型引張試験機により行ない、試験片は平行部の直径が3.0mm、長さが15mmである。

3. 結果および考察

3.1 Ms温度およびマルテンサイト量の測定

MsおよびMs以下の各温度におけるマルテンサイト生成量の測定にはGRENINGER-TROIANOの組織法が広く用いられている。生成したマルテンサイトを黒化させるために400°C×5secの焼もどしを行なつて測定したところ、Fig. 1の×印のような結果がえられた。Fig. 1で縦軸は未変態のオーステナイト量、横軸はMsと各変態温度(Tq)との差である。一方、熱膨張測定とX線回折測定から得られたマルテンサイト変態量はFig. 1の白丸のようになる。両者による測定値は変態量の少ない時にはほぼ一致しているが、温度の低下と共に組織法では高い変態量を示すようになる。Ms以下の各温度とマルテンサイト変態量との関係については、GRENINGER, TROIANO⁶⁾(半定量的)、GRANGE, STEWART⁷⁾, HARRIS, COHEN⁸⁾らが組織法による測定を行なつている。そしてHARRISらは未変態オーステナイト量が、

$$V_r = 6.95 \times 10^{-13} [455 - (Ms - T_q)]^{5.32} \dots (1)$$

で表わされるとしている。ここでV_rは未変態のオーステナイト量(%), Msはマルテンサイト変態開始温度(°C), T_qはMs以下の変態温度(°C)である。また、KOISTINEN, MARBURGER⁹⁾はX線回折法によつて、

$$V_r = 10^2 \exp[-1.10 \times 10^{-2} (Ms - T_q)] \dots (2)$$

なる式を得ている。これらのデータをFig. 1に示した。GRANGEらのデータ(SAE 4140鋼)②はMs以下約30°Cから急速に高いマルテンサイト量を示している。焼もどし温度としてGRENINGERらは280°C×5sec, GRANGEらは704°C×5sec, HARRISらは332°C×10secを採用している。GRANGEらの温度は非常に高いが中炭素のCr-Mo鋼は600°C付近で変態が遅れ、むしろ適切な温度のように思われる。

Table 2. The amount of martensite (%) measured after tempering at various temperature. (°C)

Transformation temp. (°C)	Tempering temperature (°C)			
	No temper	320	400	600
276	6	5	8	25
253	26	26	43	55
236	—	36	61	83

著者らは焼もどし温度の影響を調べるために、Ms 以下の各温度に 7 sec 保持してマルテンサイト変態を行なわせた後にそのまま水冷および 320°, 400°, 600°C の各温度で 5 sec 焼もどした時のマルテンサイト量を測定した。結果を Table 2 に示す。焼もどし温度が 400°C 以上になると、マルテンサイトの焼もどし以外の変態が起こり見かけ上の変態量が多くなつていゝと考えられる。この混在組織は焼もどしマルテンサイトと区別が付き難いがベイナイトと思われる。このように組織法では適切な焼もどし温度(低い方が望ましい)を選ぶことが重要である。

320°C の焼もどしによる測定値は Fig. 1 の黒丸のようになり、熱膨張計および X 線による測定値や KOISTINEN らの結果とよく一致している。

3.2 Ms 付近における恒温変態

Ms 付近における恒温変態図を Fig. 2 に示す。本図では組織観察によつて微量のマルテンサイトが認められる温度を仮りに Mt と名づけ、マルテンサイト量が約 1% の温度を Ms とする。各変態曲線は Ms 以下では未変態オーステナイトを 100% とした時のベイナイト生成量 (%) を示す。

マルテンサイトによるベイナイト変態の促進効果は Mt 直下では著しいが、変態量の増加とともに減少しているようである。また、変態温度の低下につれてその効果ははつきりしなくなる。

AUSTIN-RICKETT¹⁰⁾によるとベイナイト変態には、

$$y/(1-y) = kt^n \dots\dots\dots (3)$$

の式が適用される。ここで y は時間 t において変態したオーステナイトの割合、k および n は定数である。本実験のデータについて log[y/(1-y)] 対 log t のグラフをかくと Fig. 3 のようになる。Mt 以上では 1 つの直線になるが、Mt 以下では 2 つの直線に分かれている。そして直線の勾配 n は最初の部分のほうが大きく、マルテンサイトによる促進を示している。そして第 2 の直線に移るところからこの促進効果は

消えて行くと考えられる。この移行点は変態温度の低下とともに低変態量側へ移り、促進効果が減少することを示している。変態の速度定数 n は Ms 以上では約 4.0 であるが、Ms 以下では 1.4~2.0 になる。このことから Ms を境にしてベイナイト変態の kinetics に相異があると考えられる。

マルテンサイトによつてベイナイト変態が促進される機構はわかつていないが、ベイナイト変態は応力を加えることによつて促進される¹¹⁾¹²⁾ことから、マルテンサイトの生成によつて周囲のオーステナイトは弾性および塑性歪をうけ、このために生じた格子欠陥がベイナイト変態の核となることも 1 因かもしれない。

3.3 機械的性質

Fig. 2 の恒温変態図からもわかるように中炭素の Cr-Mo 鋼では高温のベイナイト変態をさけるような焼入れを行なつても、Ms 以下でベイナイト変態を起こす可能性がある。そこでその機械的性質を調べるために 850°C でオーステナイト化した後に、Ms 以下のベイナイト変

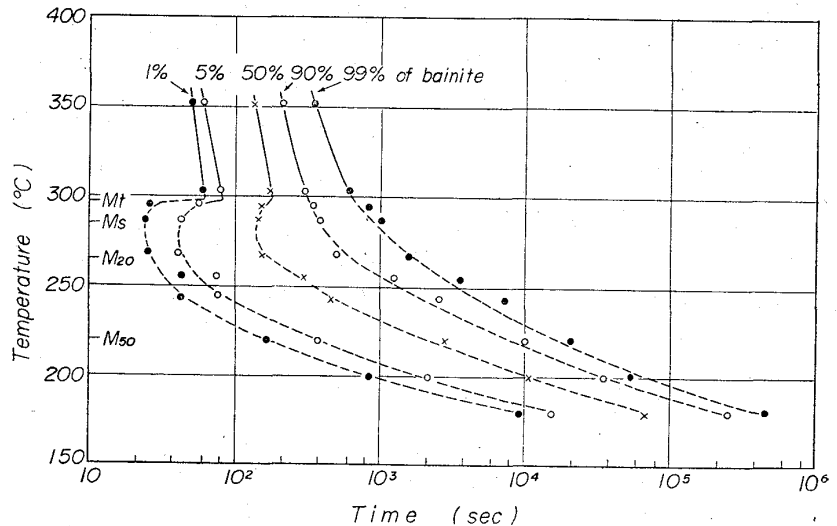


Fig. 2. Isothermal transformation diagram of Cr-Mo steel.

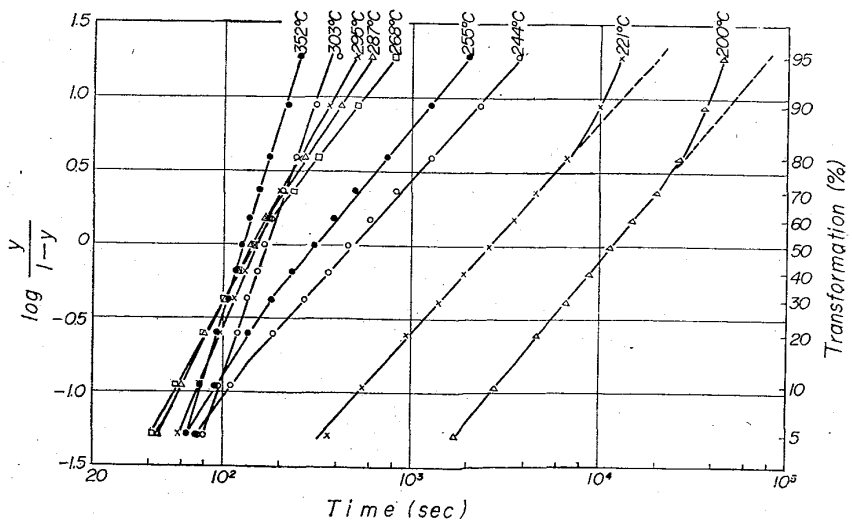


Fig. 3. Reaction curves of bainite in a temperature range near Ms.

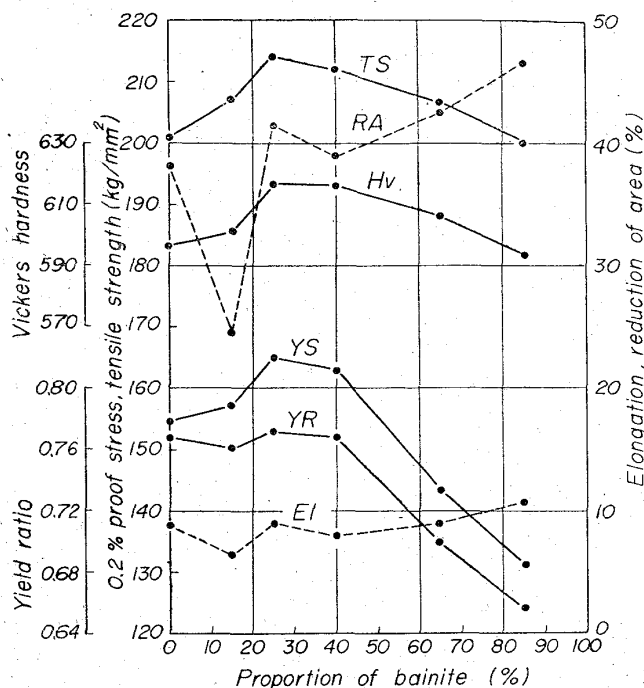


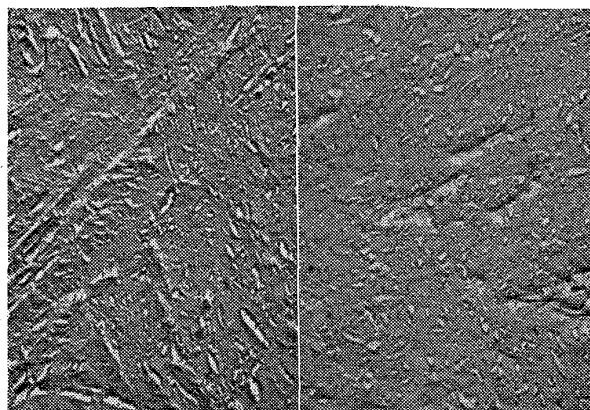
Fig. 4. Mechanical properties of the 0.5% C-Cr-Mo steels with mixed structures of bainite and tempered martensite in various proportions.

態の nose に近い 270°C に恒温保持し、適当なベイナイト量をえた後に油焼入れし、再び 270°C に焼もどしているいろいろな割合の焼もどしマルテンサイトとベイナイトの混合組織をつくつた。

試験結果を Fig. 4 に示す。引張強さと硬さは同一の傾向を示してベイナイト量の増加とともに増加し、約 30% で最高値に達した後に再び減少し、85% ベイナイトでは 100% 焼もどしマルテンサイトとほぼ同一の値になる。このようにベイナイト量とともに強さが増加するのは、最初の板状ないしレンズ状の大きなマルテンサイトに続いて生成した細い針状のベイナイトが、続いて油焼入れした時に生成するマルテンサイトの成長を阻止して微細にするためと考えられる。しかし一方ではベイナイト量の増加とともに未変態オーステナイトは少なくなり、マルテンサイト量が減少するので最大値が現われることになる。

降伏点 (0.2% 永久伸び) はベイナイト量が 40% 以上になると、急激に低下し降伏比の減少をもたらす。

伸びには著しい変化はみられないが、絞りにはベイナイト量が約 25% 以上ではその増加とともによくなる。低温ベイナイトの靱性が焼もどしマルテンサイトよりもすぐれている理由ははつきりしていないが、両者の組織 (Photo. 1) を比べると焼もどしマルテンサイトでは炭化物が板状に近く並んでいるのに対して、ベイナイトでは比較的球状をなしている。このような炭化物の析出形態が原因の一つになっていると考えられる。ベイナイト量が 15% の時に絞りは約 1/2 に低下しており、その理由ははつきりしないが、組織的には不連続性は認められずさらに詳しく調べる必要があると思われる。



a) Tempered martensite
b) Bainite $\times 10,000(9/10)$

Photo. 1. Microstructures of Cr-Mo steel.

4. 結 言

0.5% C の Cr-Mo 鋼について Ms 温度付近のベイナイト変態の kinetics や機械的性質を調べた。

1. GRENINGER-TROIANO の組織法により Ms 以下の各温度におけるマルテンサイト量を測定する場合には、焼もどし温度をできるだけ低くする必要がある。

2. Ms 付近のベイナイト変態には AUSTIN-RICKETT の式が適用され、Ms を境にしてベイナイト変態の kinetics に相異が認められた。

3. 同一温度における焼もどしマルテンサイトとベイナイトの混合組織において、ベイナイト量が約 30% の時に引張強さは最大になる。これはベイナイトによるマルテンサイト組織の微細化によると考えられる。

4. 靱性はベイナイト量が約 25% 以上ではその増加とともに向上する。これは炭化物の析出状態が大きな役割を果していると考えられる。

文 献

- 1) P. VASUDEVAN, L. W. GRAHAM & H. J. AXON: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 188 (1958), p. 386
- 2) S. V. RADCLIFFE & E. C. ROLLASON: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 191 (1959), p. 56
- 3) J. S. WHITE & W. S. OWEN: J. Iron & Steel Inst. (U. K.), 195 (1960), p. 79
- 4) R. T. HOWARD & M. COHEN: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 176 (1948), p. 384
- 5) H. J. ELMENDORF: Trans. Amer. Soc. Metals, 33 (1943), p. 236
- 6) A. B. GRENINGER & A. R. TROIANO: Trans. Amer. Soc. Metals, 28 (1940), p. 537
- 7) R. A. GRANGE & H. M. STEWART: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 167 (1946), p. 467
- 8) W. J. HARRIS & M. COHEN: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 180 (1949), p. 447
- 9) D. P. KOISTINEN & R. E. MARBURGER: Acta Met., 7 (1959), p. 59

- 10) J. B. AURTIN & R. L. RICKETT: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 135 (1939), p. 396
 11) 山本: 鉄と鋼, 38 (1952), p. 459
 12) S. BHATTACHARYYA, G. L. KEHL: Trans. Amer. Soc. Metals, 47 (1955), p. 351

(162) 9% ニッケル鋼の焼入れ焼もどし

大阪大学工学部

工博 美馬源次郎・○高橋純造

日立造船, 技術研究所

工博 山根寿巳

Tempering a 9% Nickel Steel.

Dr. Genjiro MIMA, Junzo TAKAHASHI and Dr. Toshimi YAMANE.

1. 緒言

低温用鋼 9%ニッケル鋼を焼入れしたのち、焼もどすさいに現われる諸現象に対する統一的理解を明らかにするため焼もどしによる機械的性質と内部摩擦の変化および遷移温度をシャルピー衝撃試験から求め、また焼入れした試料を加熱しながら比熱を測定した。

2. 試料および実験方法

実験に使った 9%ニッケル鋼は八幡製鉄(株)製の 25 mm 厚さの鋼板でその化学組成は Table 1 のとおりである。

受け入れ状態における鋼板の引張性質は、引張強さ 107.3 kg/mm^2 , 降伏強さ 99.4 kg/mm^2 , 伸び 42% であつた。この鋼板から圧延方向に対して垂直に試験片の長さ方向をそろえて試験片を切り出した。シャルピー試験片の切欠きは板厚面に入れた。熱処理はまず 875°C に試験片を 30min 保持後水焼入れをした後で、各焼もどし温度に 30min 間保持して空冷した。内部摩擦は同一試験片で測定したほうが誤差が少ないので 870°C から焼入れ後、低温の焼もどし温度から 30min 間、順次高温の焼もどし温度に焼もどしを繰り返し測定は室温で行なつた。

実験に使った引張試験片は JIS 4 号試験片で平行部は $14 \text{ mm } \phi$, 標点距離は 50 mm であつた。シャルピー衝撃試験片は JIS 5 号 2 mm V 切欠き試験片を使った。比熱は長崎・高木の方法¹⁾で理學電機(株)製の測定装置で測定した。

内部摩擦測定用試験片は 5 mm 厚 $\times 10 \text{ mm}$ 巾 $\times 200 \text{ mm}$ 長さで測定方法²⁾は電磁的方法で試験片に横共鳴振動を与え駆動電流を切り試験片の自由減衰を行なわしめ、試験片のひずみ振巾がはじめの $1/n$ になるまでの時間(本実験では $1/4$ になるまでの時間) t_n (sec) を

Table 1. Chemical composition of the specimen. (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.07	0.20	0.60	0.013	0.007	8.95

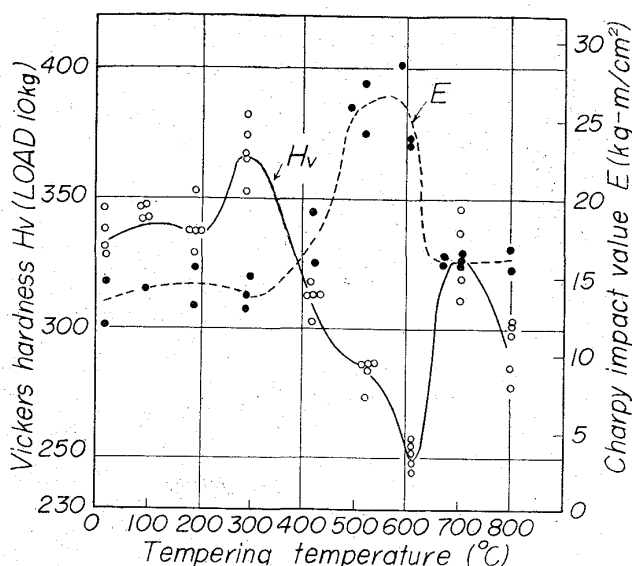


Fig. 1. Mechanical properties of the specimen tempered after quenching from 875°C .

測定して共鳴振動の周波数 f_0 (c/s) から次式により内部摩擦を求めた。

$$Q^{-1} = \ln n / (\pi f_0 t_n)$$

ここで Q^{-1} は内部摩擦である。

3. 実験結果および考察

875°C より水焼入れ後焼もどした試料の引張り性質と焼もどし温度の関係のうち伸びは 300°C あたりの焼もどしにより最小値を示す。これは焼入れにより生じていた残留オーステナイトがマルテンサイトに分解するためであると考えられる。 600°C 焼もどしで最大の伸びが見られ、それ以上の焼もどし温度で焼もどすと焼入れの状態に近い値にまで低下する。

硬さとシャルピー衝撃値の焼もどしによる変化は、Fig.1 に示すとおりである。図で 300°C あたりの焼もどしにより硬さは最大値を、シャルピー衝撃値は極小値を示している。これは残留オーステナイトの一部がマルテンサイトに変態するためであると考えられる。Photo. 1 は 875°C から焼入れした試料を焼もどした電子顕微鏡で観察したレプリカの組織である。シャルピー衝撃値が最も低い値を示した 300°C で焼もどした組織をみると、針状のマルテンサイトのような模様と粒界に白色をしたオーステナイトと思われる組織が少量認められる。Fig.1 においてシャルピー衝撃値が最大を示し、硬さが最小値を示した 600°C での焼もどしの組織は Photo. 1 に見られるように白色粒界に存在するオーステナイトと思われる組織が多くなって、マルテンサイトらしい組織は消失している。

つぎに内部摩擦のひずみ振巾依存性を調べてみると焼入れのままではひずみ振巾依存性はほとんどないが焼もどし温度が高くなると次第に大きなひずみ振巾依存性を有するようになっていく。

低ひずみ振巾における内部摩擦と焼もどし温度の関係を求めてみると、Fig. 2 に示すような結果がえられた。焼入れの状態から焼もどし温度を高くして焼もどすと、 400°C あたりまではひずみ振巾に非依存性の内部摩擦は