構 造 用 合 金 鋼 の 靱 性 に お よ ぼ す ベ イ ナ イ ト 組 織 の 影 響*

津 谷 和 男**

Kazuo Tsuya: The Influence of Bainite on the Ductility of Alloy-Structural Steels. In order to study the mechanical properties of slack-quenched steel, the influence of bainite on the ductility of steels has been investigated. The principal results are as follows: (1) The detrimental effect of bainitic structures formed by continuous cooling transformation increases as the amount of bainite is increased. (2) The bainitic structures isothermally formed at higher temperatures remarkably damage the ductility, though the detrimental effect of bainite formed at temperatures near M_s is negligible.

(Received March 21, 1960)

** 金属材料技術研究所

* 1958 年 4 月本会東京大会に発表

I. 結 言

鋼の不完全焼入組織はその衝撃特性と密接な関係を有するが、構造用合金鋼に現れる不完全焼入組織は多くの場合ベイナイトである (U.S. Steel の恒温変態線図集⁽¹⁾によれば、不完全焼入組織としてパーライトが認められるのは Cr 鋼の一部および炭素鋼だけで、Ni-Cr-Mo 鋼、Cr-Mo 鋼、Ni-Cr 鋼などの 2 元、3 元合金鋼でジョミニ試験片上に認められる組織はベイナイトまたはフェライトである)。したがって不完全焼入組織としてのベイナイト組織が鋼の機械的性質に如何なる影響をおよぼすかは工業上重要な意味を有している。ベイナイト組織が鋼の機械的性質におよぼすもつとも重要な影響は靱性の低下である。一般に不完全焼入鋼の衝撃値は同一硬度の完全焼入鋼と比較すると低いことが多い。この靱性の低下の程度は現れる不完全焼入組織の種類によつても異なるが、Hollomon らの実験⁽²⁾によれば衝撃値を低下させる作用は、パーライトがもつとも大で、ベイナイトがこれについている。また同じベイナイトでも生成温度が高いものほど有害であることが報告されている。

つぎにベイナイト組織が鋼の靱性を劣化させる機構については種々の説がなされているがまだ定説はない。Klier と Lyman⁽³⁾、あるいは Bailey⁽⁴⁾ はベイナイトの生成によつてその周辺のオーステナイトの炭素濃度が増加し、冷却の際にこのオーステナイトから生じた高炭素マルテンサイトが衝撃値を低下させると考えている。また Troiano⁽⁵⁾ らはおもに上部ベイナイトが衝撃値を低下させる事実に着目して、上部ベイナイトとマルテンサイトの間に存在する硬度差が靱性劣化の原因だとしている。これらの説はいずれも一応の解釈にすぎずさらに検討を行うことが必要と思われる。

本実験はベイナイト組織が鋼の硬度および衝撃値におよぼす影響を種々の条件のもとにおいて調べ、どの程度まで不完全焼入しても鋼の靱性が低下しないかを検討しようとするものである。

II. 試 料 お よ び 実 験 方 法

Table 1 Chemical compositions of steels used.

	Chemical analysis					
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
Cr-Mo steel	0.39	0.28	0.79	0.12	1.07	0.17
Ni-Cr-Mo steel	0.43	0.30	0.64	1.78	0.78	0.18

実験に使用した試料は Cr-Mo 鋼および Ni-Cr-Mo 鋼の 2 種類でその化学成分は Table 1 のようである。一端焼

- (1) U.S. Steel Co. Research Laboratory: *Atlas of Isothermal Transformation Diagrams*, (1950).
- (2) J.H. Hollomon, L.D. Jaffe, D.E. McCarthy & M.R. Norton: Trans. ASM, **38** (1947), 807.
- (3) E.P. Klier & T. Lyman: Trans. AIMME, **158** (1944), 394.
- (4) E.F. Bailey: Trans. ASM, **46** (1954), 830.
- (5) R.F. Hehemann, V.J. Luhan & A.R. Troiano: Trans. ASM, **49** (1957), 409.

入試験およびシャルピー試験はいずれも JIS によつて行つた。またベイナイト量の測定は点算法または線解析法を使用した。

III. 実 験 結 果

1. 連続冷却ベイナイト変態が衝撃特性におよぼす影響

実際に構造用合金鋼を焼入れた際に生ずる不完全焼入組織は連続冷却変態の結果生じたベイナイトであることが多

いので、連続冷却ベイナイト変態が Cr-Mo 鋼の衝撃特性に如何なる影響をおよぼすかを調べた。

Fig. 1 は空冷によつて生じたベイナイト組織が Cr-Mo 鋼の衝撃特性におよ

Fig. 1 Toughness of full or slack quenched steels.

す影響をしらべたもので、試料には $10 \times 10 \times 55$ mm のシャルピー試験片を使用した。空冷によつて生じたベイナイト量は点算法によつて測定した結果 81 % であつた。図に示されたように空冷したものの特性は完全焼入のものに比較して著しく劣化しているが、その衝撃値は同一硬度水準では Rc 30 附近で両者の差がもつとも大である。これらの不完全焼入組織は連続冷却の結果生じたものであるので、連続冷却変態の進行が衝撃特性にどのような影響をおよぼすかを同じ Cr-Mo 鋼について検討した。すなわち Cr-Mo

Fig. 2 Transformation on Jominy end quenched bar during continuous cooling.

鋼のジョミニ試験片 11 本を用意し、各々 855° より一端焼入を行い下記の時間保持したのち焼入装置より脱して水冷した。(保持時間 30, 50, 90, 105, 120, 150, 200, 250, 300, 400, 500 秒) これらの試料について水冷端より 27.5 mm, 50 mm, 87.5 mm の

位置の硬度およびベイナイト量を測定し、ジョミニ試験片上の変態の進行状況をしらべた。Fig. 2 はその結果である。図示

のように 27.5 mm の位置では変態はもつとも早く進行するが、出現するベイナイトの量は約 50% にとどまっており硬度の低下も比較的小である。次に 50 mm および 87.5 mm の位置ではベイナイト変態の開始はやや遅いが、開始すると急速に進行しほとんど全部 (約 90% 程度) がベイナイトに変化する。そしてこれらのベイナイト変態に伴う硬度変化もまた大である。このような変態の進行に伴って衝撃特性もまた変化するがその状況は Fig. 3 に示されている。

Fig. 3 Effect of bainite transformation on the toughness of Cr Mo steel.

る。衝撃特性はいずれの位置においてもベイナイトが生成するにしたがつて低下し、点が原点側に近づく傾向を示している。そしてベイナイト量の影響は約 40% 以上でとくに顕著であることが認められた。

2. 恒温ベイナイト変態が衝撃特性におよぼす影響

以上の結果から判るように連続冷却変態によつて生じたベイナイト組織はその量が 40% 以上になると著しく衝撃特性を害することが判つた。このようにベイナイトの量は靱性と密接な関係を有するが、ベイナイトの質も当然靱性に影響するので、種々の異つた変態温度で生成したベイナイトが靱性におよぼす影響をしらべた。試片には 10×10

Table 2 Bainite percent of heat treated specimens.

Treatment	Bainite (%)	Mark
350° × 200 sec	25	○
× 400 "	65	△
× 5000 "	100	×
400° × 150 sec	40	○
× 400 "	69	△
× 5000 "	82	×
450° × 200 sec	52	○
× 500 "	63	△
× 5000 "	69	×
500° × 2000 sec	22	○

× 55 mm の Ni-Cr 鋼の シャルビー試験片を使用し、ベイナイト量の測定は線解析法によつた。また衝撃試験は

−70°, −30°, +25°, +98° の 4 種類の温度において行つた。Table 2 は各温度における変態の進行状況を示したも

Fig. 4 Influence of microstructure on ductility at −75°.

Fig. 5 Influence of microstructure on ductility at −30°.

のである。

次に Fig. 4 は −75° における衝撃特性とベイナイトの質の関係をしらべたもので、350° で生成したベイナイトは余り靱性に影響しないが 400°, 450° ではかなり劣化させ

ることが判る. また 500° ではベイナイトの量が少ないためその影響は認められない. また -75° のように低い試験温度では完全焼入のものでも余り衝撃特性がよくないことが判る. つぎに -30° の結果は Fig.5 に示す如くで -70° とほぼ同様の傾向を示している. また $+25^{\circ}$ では試験温度が高いため完全焼入のものの衝撃値が高くベイナイトを含むものとの差が著しくなっている (Fig.6). Fig.7 は $+98^{\circ}$ の結果で衝撃値はさらに上昇している.

次に Fig.8 は各種のベイナイトが衝撃値温度曲線に如何なる影響を示すかをほぼ同一硬度水準 (Rc 32~34) で

Fig.6 Influence of microstructure on ductility at 25° .

調べたもので, ベイナイトの生成により遷移温度が上昇することが判る. またベイナイト生成による衝撃値低下は $-20^{\circ} \sim -30^{\circ}$ 附近でもつとも著しい. 以上の結果に示されたようにベイナイトは高温で生成したものほど靱性を劣化させる傾向がある.

3. ベイナイト組織と靱性の関係についての二三の考察

ベイナイト, とくに上部ベイナイトが鋼の靱性を劣化させる原因については前述のように種々の説が唱えられているがまだ明らかでない点が多い. Troiano⁽⁵⁾ は不完全焼入組織と周囲のマルテンサイトの硬度差が靱性の低下の原因と考えているので, この説の当否をたしかめるために CrMo 鋼のジョミニ試験片上の各位置の微小硬度のヒストグラムを求めてみた. なお硬度測定は 25g 測定数は 100 とした. また硬度差が明瞭に現れるように焼戻温度

は 200° という低い温度を選定した. Fig.9 はその結果である. 図に示されたように微小硬度の平均値は水冷端から

Fig.7 Influence of microstructure on ductility at 98° .

Fig.8 Effect of microstructure on transition curve.

はなれるにしたがつてやゝ増加し 50 mm をすぎると急に低下している. また硬度のばらつきも平均値と同様 31mm 附近で最大になり, ほとんどがベイナイトになる 60~90 mm ではばらつきは非常に小になっている. Fig.3 の結果によれば 87.5 mm の位置ではベイナイト変態が進行すると著しく衝撃特性が低下するが, この附近の微小硬度のばらつきは比較的小である. それゆえ靱性の低下が硬度差にもとずくとする説にはやゝ疑問が持たれる.

次にベイナイト、とくに上部ベイナイトが生成するとその周囲にオーステナイトが残留することはよく知られてい

Fig. 9 Frequency diagrams of micro vickers hardness on tempered Jominy bar ($200^\circ \times 1\text{hr}$ temper).

るが、このオーステナイトの存在が靱性に如何なる影響を有するかをしらべてみた。試料はCrMo鋼で、一端焼入後行つた $-70^\circ \times 20\text{ min}$ のサブゼロ処理がその 200° の焼戻硬度におよぼす影響をしらべた。Fig. 10に示されたようにサブゼロ処理による硬度上昇は水冷端および尾部において見られるが、その値は比較的小で Rc 1 程度である。つぎにこれらの試片から切欠部が水冷端より 85 mm の位置に来るようにシャルビー試験片をとりサブゼロ処理による衝撃値変化をしらべた。Fig. 11はその結果である。図示のように残留オーステナイトの有無は靱性には余り影響しないものと思われる。以上の実験からはベイナイトが靱性を劣化させる原因は明らかでないが、Klier ら⁽³⁾の高炭素マルテンサイトの生成が靱性に悪影響を与えるという考え方が一応妥当ではないかと思われる。

IV. 総 括

(1) Liedholm の方法により不完全焼入組織量の異つた焼入性試片を作り、これより衝撃試験片を作つて連続冷却変態組織が衝撃特性に如何なる影響をおよぼすかを調べた。その結果ベイナイト量がますます衝撃特性が低下すること、ベイナイト量の影響は 40% 以上で顕著なことなどが判つた。

Fig. 10 Effect of sub zero treatment on Jominy curve.

Fig. 11 Effect of sub zero treatment on impact value of slack quenched steel.

(2) つぎに恒温変態によつて生成したベイナイト組織が衝撃特性におよぼす影響を調べた。その結果 Ms 点附近の低温で生成したベイナイトは靱性に影響をおよぼさないが、高温域で生成したベイナイトは靱性を著しく劣化させることが判つた。

(3) ベイナイト組織が靱性を劣化させる原因を検討するために二三の実験を行つた。その結果靱性の低下はベイナイトとマルテンサイトの硬度差や残留オーステナイトの存在によるものではないことが判つたが、それ以上の結論は得られなかつた。