亜急熱焼入鋼の機械的性質について (第4報)*
疲れ強さについて

大和久重雄** 飯島一昭**

Sigeo Ôwaku and Kazuaki Iijima: On the Mechanical Properties of Rapid-Heated and Quenched Steel (4th Report). The effects of quenching methods—semi-rapid heating and quenching, and ordinary quenching—on the hardness, the fatigue limit and the bend-breaking stress have been studied with quenched and tempered 0.81% C steel wire specimens. The results were as follows: (1) The hardness differences due to these two quen-

** 鉄道技術研究所

* 1954年4月本会東京大会に発表

ching methods are negligibly small. The hardness decreases nearly continuously as the tempering temperature rises. (2) The fatigue limit differences due to the quenching methods are also small when the tempering temperature is higher than 300°. The fatigue limit decreases as the tempering temperature rises, consequently as the hardness decreases. (3) But the fatigue limit and the bend-breaking stress differences are noticeably larger, when the tempering temperature is lower than 300°. Semi-rapid heated and quenched specimens show superior values as compared with ordinary quenched ones. And these properties are improve as the tempering temperature rises. (4) The above results can be explained by the negative effects on the properties of quenched steel of the microstress induced by martensite formation in each austenite grain.

(Received October 17, 1956)

I. 緒 言

高周波焼入, 火焰焼入または鉛浴焼入のような亜急熱焼入*を施した鋼の靱性が同一硬度の普通焼入のものに較べて著しく優れた値を示すこと, この原因として未固溶セメントタイトの残存によりマルテンサイトの平均C濃度が低いためミクロの変態応力が小なることが考えられることなどについてはすでに前々報⁽¹⁾および前報⁽²⁾に詳述した。

高周波焼入を施した中炭素鋼の疲れ強さが普通焼入のものに較べて高い値を示すことがよく知られているが⁽³⁾⁽⁴⁾, この原因として主に表皮焼入に起因する表皮部圧縮応力の存在が考えられている。

著者等は今までの実験結果から, 焼入層そのものの材質的に高い疲れ強さを有すべきものと考え, これを確かめると同時に亜急熱焼入鋼の本性をさらに詳しく検討する目的で次のような実験を行った。

II. 実験方法

1 試験片

Table 1は本実験に用いた試験片の化学成分を示すものである。

Table 1 Chemical composition of specimen.

Element	C	Si	Mn	P	S
%	0.81	0.30	0.54	0.031	0.036

試験片の大きさは3.04φ×100mmで, 一端は疲労試験機に取付けるため直角に曲げてある (Fig. 3参照). 各種の焼入処理はすべて真空中で1 hr 焼鈍後行つた。

2 熱処理

(1) 亜急熱焼入

試験片を800°に恒温保持した鉛浴中に浸漬し15 sec 保持後種油(60°)中に焼入した。この15 sec なる時間を採用したのは次の理由による。すなわち, 鉛浴中の浸漬時間と焼入硬度との関係を図示した Fig. 1 の試験結果によれば, 5~7 sec で焼入硬度が得られ, フェライト**→オーステナ

イト変態が一応完了したことを示している。

R. F. Mehl の 0.85 % C 鋼に対する実験結果⁽⁵⁾および著者らの 0.65 % C 鋼に対するそれ⁽¹⁾によれば 800° への急加熱保持による上述の変態に要する時間は, それぞれ約 3 sec および 7 sec であり, 本実験結果とよく一致する。またパーライト中のセメントタイトが一応オーステナイトに溶け込むに要する時間はそれぞれ約 1~3 min である。従つて亜急熱焼入組織, すなわち未固溶セメントタイトを含む不均一固

Fig. 1 Relation between hardness of semi-rapid heated and quenched 0.81 % C steel Vs immersing time (in lead bath).

Fig. 2 Schematic diagram of semi-rapid heating and quenching (a) and ordinary quenching (b) methods.

溶焼入組織を得るには本試験片に対しては約 7 sec~3 min を要することとなる。亜急熱焼入鋼の特性は保持時間の短いほど, すなわち未固溶セメントタイトの多いほど著しいので, 本実験では必要かつ十分な時間として 15

sec を採用したのである。Fig. 2 (a) はこの焼入操作を図示したものである。

(2) 普通焼入

真空炉中にて 800° まで徐熱, 1 hr 保持後種油 (60°) 中に焼入した。Fig. 2 (b) はこの焼入操作を図示したものである。

(3) 焼戻

焼戻時間はすべて 3 hr としたが, 長時間焼戻の影響を見るため 100 および 150° 焼戻については特に 50 hr 焼戻も併せ行つた。焼戻温度は, 100°, 150°, 200°, 250°, 300°, 350°, 400°, 500° および 600° の 9 種類とした。

3. 機械的試験

(1) 硬さ試験

各種の熱処理後, それぞれ試験片 2 本を抽出し中央部の

(5) R. F. Mehl, Trans. A S M, 29(1941), 813.

(1) 大和久, 飯島, 本誌, 18(1954), 362.

(2) 大和久, 飯島, 本誌, 19(1955), 408.

* 電流による直接加熱のような瞬間的急加熱と区別するためこのように名づけた (第 1 報参照)

(3) 中村, 水馬, 本誌, 18(1954), 87.

(4) 三谷, 小林, 本誌, 16(1952), 545.

** 初析フェライトおよびパーライト中のフェライトを指すものである。

横断面についてビッカース硬度 (荷重 10 kg) を数点測定し、その平均値を求めた。いずれの場合も心部と表皮部における硬度差は殆んど認められなかった。

(2) 疲れ試験

シェンク式疲労試験機を用い繰返平面曲げ試験を行った。Fig. 3は試験片の取付状況を図示したもので、つかみ

Fig. 3 Method of setting fatigue specimen.

部からの破断を避けるため試験部とつかみ部の間に図のように黄銅板を挿入した。そのためつかみ部附近の破断は約2割程度におさえることが出来た。

(3) 曲げ破断試験

試験片を疲労試験機に取付けた状態で、静かに応力を附加し破断に至る際の最大表皮応力を求めた。

III. 試 験 結 果

Fig. 4は亜急熱焼入および普通焼入を行った試験片の焼戻 (3 hr) による硬度変化を図示したものである。焼戻法による硬度差は殆んど認められない。100° および 150° に長時間 (50 hr) 焼戻を行ったものは幾分低目の値を示している。

Fig. 4 Relations between hardness of semi-rapid heated and quenched 0.81 % C steels and ordinarily quenched ones Vs tempering temperatures.

Fig. 5 は疲れ試験による S-N 曲線の数例を示すもので焼戻温度別に両焼入処理の影響を対比せしめてある。

Fig. 6は上図より求めた疲れ強さ (a) と曲げ破断応力 (b) を焼戻温度との関連において総合図示したものである。図 (a) から明かなように焼戻温度が 300° 以上のものにおいては焼入方法による疲れ強さの差異は殆んど認められず、焼戻温度の上昇、従つて硬度の低下 (Fig. 4) と共に低下している。しかるに 300° 以下の焼戻温度においては焼入方法による差異が顕著で、亜急熱焼入のものが高い値を示しているが、いずれも焼戻温度の低いほど、従つて硬度の高いほど (Fig. 4) 低下しているのが認められる。

この後者の現象 (300° 以下の焼戻温度における) は Fig. 6 (b) の曲げ破断応力においても全く同様に認められる。

Fig. 5-a

Fig. 5-b

Fig. 5-c

Fig. 5-d

Fig. 5-e

Fig. 5 S-N curves for semi-rapid heated and quenched 0.81 % C steels and ordinarily quenched ones (tempered at indicated temperatures).

Fig. 6 Relations between fatigue limits (lower curves) and breaking stresses on bending (upper curves) Vs tempering temperature.

IV. 考 察

共析程度の鋼を完全にマルテンサイト組織とした場合、その強さがどのような値を示すかについてはあまり明らかにされていない。これは焼入によつて必然的に発生する焼入応力や焼入歪などのため正確な値が得られないことに原因するものと考えられている。

一般に硬度(ブリネル)と引張強さとの間には略々直線的な関係のあること*が認められている。ただし、これはブリネル硬度約 600 以下でのことであるが、この関係をさらに高い硬度にまで適用すると焼入硬度附近では 250 kg/mm 位の引張り強さを示すはずである。0.80% C 鋼を水焼入して 311,000 psi (223 kg/mm²) の引張り強さが得られたという記述**もある。

しかし、これは恐らく特殊な例であつて、一般には著しく低い値を示すのが普通である。例えば、著者らの求めた曲げ破断応力(引張り強さより一般に高い値を示す)、は焼入まゝのもので 80~90 kg/mm² で焼戻温度 200° の約 160 kg/mm² よりはるかに低い。

本実験に用いた試験片は 3.04 mm φ の細い線材であり、焼入も油中に行つたのであるから焼入応力や焼入歪は非常に小さいはずで、従つて破断応力がこのように低い値を示す原因は他にあるものと考えざるを得ない。

普通、焼入応力と称せられるものは焼入の際、表皮部と心部に変態の時間的なずれのある場合などに発生するもので、いわばマクロ的な応力である。これに対して焼入の際、オーステナイトの結晶粒内に無数のマルテンサイト片が爆発的に生成されることによるミクロ的な応力発生も当

然考えられなければならない。これは試験片の形状寸法には殆んど関係しないはずである。このミクロ的焼入応力の大きさは H. Krainer⁽⁶⁾ によれば略々 120 kg/mm² であり、また J. A. Wheeler および M. A. Jaswon⁽⁷⁾ によれば略々 93 t/in² (約 150 kg/mm²) である。このように著大な応力は当然材料の強さに悪影響を及ぼすはずで、前者⁽⁶⁾は曲げ破断応力についてこの点に言及している。

亜急熱焼入鋼が普通焼入鋼よりも曲げ破断応力が大であるのは、いま迄の実験結果⁽¹⁾とよく一致しており、またその原因としては緒言にも述べたように前者においては未固溶セメントライトが残存しているため、マルテンサイトの平均 C 濃度が低く、従つてこのミクロ的応力が小なることによるものと考えられる。また、100~300° の焼戻において、焼戻温度を高めるかまたは時間を長くすることによつていずれも破断応力が大となるのは、このミクロ的応力がカーバイドまたはセメントライトの析出によつて減少することによるものであろう。

疲れ強さが、引張り強さ、従つて硬度(やはり低硬度で)と略々比例的な関係にあることもよく知られている。この硬度との関係は 300° 以上の焼戻温度のものについてはよくあてはまり、前述のミクロ的応力の影響が殆んど消失したことを示すものと考えられる。しかし、300° 以下の焼戻温度のものにおいては前の曲げ破断応力の場合と全く同様の現象が認められ、やはりミクロ的応力の存在が強く示唆される。

V. 結 言

以上の結果を要約すれば次の如くである。

(1) 0.81% C 鋼の線材 (3.04 mm φ) に亜急熱焼入および焼戻を施しその硬度、疲れ強さおよび曲げ破断応力を同一材質および形状の試験片に普通焼入および焼戻を施したものと比較せしめた。

(2) 硬度および 300° 以上の焼戻温度における疲れ強さには両焼入方法による差異が殆んど認められず、いずれも焼戻温度の上昇と共に略々連続的に低下する。

(3) しかし、300° 以下の温度に焼戻したものの疲れ強さおよび曲げ破断応力においては焼入方法による差異が顕著に認められ、亜急熱焼入を施したものが普通焼入のものに比べて高い値を示すこと、またいずれも焼戻温度の上昇と共に向上し硬度変化とは全く逆の傾向を有することなどが明らかとなつた。

(4) これらの諸結果は焼入材の強さを悪化せしめる主要な因子として、オーステナイト結晶粒内におけるマルテンサイト生成に基因するミクロ的応力の存在を導入することによつてよく説明される。

(5) 高周波焼入などの表皮急加熱焼入を施した鋼の疲れ

* 例えば Bullens, *Steel and Its Heat treatment*, 4th Ed., (1938) (p. 20, Fig. 8).

** Ernest J. Teichert, *Metallography* (1944) and *Heat treatment of Steel*, *Ferrous Metallurgy* vol. III, (p. 209) による。

(6) H. Krainer, *Arch. Eisenhütt.*, **22**(1951), 53.

(7) J. A. Wheeler and M. A. Jaswon, *J. Iron & Steel Inst.*, **157**(1947), 161.

強さが、普通焼入のそれに比べて著しく高い値を示す原因は、単にマクロ的な表皮圧縮応力の存在のみによるものではなく、焼入層の材質そのものにも基因するものであることが明らかとなつた。