Ni-Cr 鋼の焼戻脆性と焼戻硬度について

武 井 英 雄*

Hideo Takei: On the Relation between Temper Brittleness and Hardness of the Ni-Cr Steel. The well-known methods to avoid the temper brittleness of Ni-Cr steel are (1) to add Mo to the steel, (2) to cool it rapidly after tempering at the temperature above 600°, avoiding the low tempering temperature ranging from 450° to 575°, or (3) to cool it rapidly after short time tempering at 450~575°. This experiment is carried out to obtain the practical data on the third method. The results obtained are as follows: (1) At the tempering temperature ranging from 450° to 575°, the shorter the tempering time is the smaller the degree of the first temper brittleness is. So the short time tempering can eliminate the first temper brittleness. (2) If the hardness is taken as the measure of the degree of tempering, the effects of tempering are remarkable at the initial stage. So for the softening of the steel, the tempering time of about 1 hr is enough for ordinary purposes. (3) Accordingly, if Ni-Cr steel is cooled in water after tempering for a time less than 1 hr, both the first and the second temper brittleness are avoidable. (4) Hollomon and Jaffe's experimental formula on the hardness of tempered steel is also applicable to the steel used in this experiment. (5) The quenching temperature vs. impact value curve shown in this paper, is theoretically equivalent to the equilibrium impact value curve proposed by Greaves and Jones.

(Received June 27, 1956)

I. 緒 言

一般に焼入鋼に焼戻を行う場合、焼戻温度が高くなるに従って硬度、抗張力は減じ、伸び、有溝衝撃値は増加するのが普通であるが、Ni-Cr 鋼など若干の特殊鋼ではある温度範囲で焼戻をしたもの、および焼戻後徐冷したものでは充分軟化しているにも拘らず、有溝衝撃値が異常に小さいという現象がある。この現象は焼戻脆性といわれ、すでに古くから研究されており、詳細なる総合報告⁽¹⁾も発表されている。一方 Ni-Cr 鋼などの強靱鋼は焼入後比較的高い温度で焼戻をして使用するのが普通で、この焼戻脆性の防止法を考えることは実用上極めて重要なことである。現在この対策として考えられる方法は、(1) Mo を添加すること。(2) 第一焼戻脆性の起る温度範囲(450~575°)での焼戻をさせて 575° 以上の高温で焼戻を行って後急冷すること。(3) 450~575° で焼戻す場合は出来るだけ焼戻時間を短くして、焼戻後急冷すること、などである。この(3)の方法についての実際のデータを得るためにこの実験を計画した。次にその結果を報告する。

II. 実験試料および方法

試料は日本特殊鋼 K. K. 製の Ni-Cr 鋼第 2 種で直径 16 mm の熱間圧延材である。その分析結果を Table 1 に示す。

Table 1 Chemical composition of specimens.

Mark	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Cr(%)	Ni(%)
SNC 2	0.27	0.32	0.47	0.015	0.015	0.76	2.78

衝撃試験は Charpy 試験機を用いて室温で行い、試験片は荒仕上ののち適當なる熱処理を施してから溝を切り、平面研磨盤でゲージに合せて所定の寸法(10×10×55 mm)に仕上げた。この場合の研磨代は 0.2~0.4 mm であった。これらの試片はすべて衝撃試験の前に硬度を測った。硬度は Rockwell 硬度計で測り、五つの測定値の平均を求めた。また硬度用の試片は直径 16mm の丸棒を長さ 10 mm に輪切りにしたものをい種々の熱処理を施したのち研磨盤で研磨した。

これらの試片の焼入はすべて 9 kW のマッフル電気爐を用いて行い、900° で 15 min 加熱して油焼入した。また衝撃試験片の焼戻は前記マッフル爐で行ったが、硬度試片の焼戻は 2 kW の電気爐を用いて鉛浴中で行った。

III. 実験結果およびその考察

* 広島大学工学部

(1) 門間, 鋼の焼戻脆性, (1954).

1. 焼戻温度-衝撃値曲線

全試料を 900° で 15 min 加熱し油焼入を行つた後 400~650° の各温度で 0.5, 1, 2, 4, 6 hr 焼戻をして、その Charpy 衝撃値を調べた。その結果を Fig. 1 に示す。圖中實線は

Fig. 1 Charpy's impact test value of the steel obtained by water-cooling or furnace-cooling after tempering at various temperatures and times.

焼戻後水冷した試料の、点線は焼戻後爐冷したものゝ衝撃値である。これによるとこの材料では 450~575° の焼戻温度域で第一焼戻脆性が認められ、575~650° の温度範囲で第二焼戻脆性が現われていて急冷試料と徐冷試料とで著しい衝撃値の差が認められる。また第一脆性は 30 min, 1 hr 焼戻後急冷したものでは殆んど現われていないで、2 hr 以上焼戻をすると著しくなっている。

2. 焼戻硬度-衝撃値曲線

Fig. 1 に用いた急冷試料の硬度を測り、硬度と衝撃値の関係を示したものが Fig. 2 (a) である。實線は焼戻時間の等しい点を、破線は焼戻温度の等しい点を結んだ曲線である。これによると焼戻時間が 30 min, 1 hr のものでは硬度の低下につれて衝撃値はほぼ直線的に増加して殆んど焼戻脆性は現われていない。これに対して焼戻時間が 2 hr 以上のものでは硬度が HRc 38~29 の範囲で軟化しているにも拘らず衝撃値が少しも増加しない。これを焼戻温度範囲から見ると 450~550° で焼戻したものであり所謂第一脆性の結果である。Fig. 2 (b) は徐冷試料についての同様な曲線で、軟化しても全く衝撃値は改善されない。なお同圖で破線はこの材料について各硬度で得られた最高衝撃値(靱性試料)を結んだ線であり焼戻脆性のない場合の理想曲線に近いものと考えられる。

3. 焼戻時間と衝撃値の関係

Fig. 1~2 によつて第一脆性は焼戻時間を短くして急冷

すればある程度避け得ることが知れたが、その脆化が時間につれてどんなに進行するかを明らかにするために、焼戻

Fig. 2(a) Relation between Charpy's impact test value and hardness number of the steel water-cooled after tempering.

Fig. 2(b) Relation between Charpy's impact test value and hardness number of the steel furnace-cooled after tempering.

温度 525° で時間を 30 min, 1 hr, 1.5 hr と、30 min おきに 6 hr まで變化して焼戻を行つた後急冷した試料の衝撃値を調べた。その結果を Fig. 3 曲線 A に示す。なお参考のために 450° および 600° で焼戻した時の衝撃値の時間的變化を附記しておいた。これによると 525° では脆化は 2 hr まで急速に進行し、それ以後は餘り變化しないようである。一次脆性のない 450° および 600° では焼戻時間が増加しても、衝撃値は低下しないで軟化につれて増加している。

4. 焼戻時間と焼戻硬度の関係

Fig. 3 Relation between Charpy's impact test value and tempering time at the constant tempering temperature.

以上で第一脆性の起る温度範囲での焼戻でも焼戻時間を1 hr 以内の短時間とすれば、ある程度脆化が防止出来ることが明らかになったが、焼戻時間を短くすることが焼戻の本来の目的である軟化に如何なる影響を与えるかを調べるために、直径 16 mm 厚さ 10 mm の試料を油焼入 (900° 15 min) した後 450~600° の各温度で 2 min~6 hr 焼戻して硬度を測った。その結果を Fig. 4 に示す。これによると

Fig. 4 Relation between hardness number and tempering time at the constant temperature.

軟化は焼戻の初期に急激に進行し、各温度で 6 hr 焼戻したものの硬度を、その焼戻温度での最低硬度と假定すると、30 min の焼戻でその軟化の約 85 % が完了していて 2 hr 以上の焼戻は殆んど効果のないことが知れる。従つて小物部

品に関する限り 2 hr 以上の焼戻をすることは意味がなく、大變不経済である。さらに軟化したいときは焼戻温度を高くすればよい。一方焼戻脆性は焼戻時間を 2 hr 以内に短くすればする程軽減出来るのであるから、この鋼材ではすべての温度範囲で 1 hr 以下の短時間焼戻の後急冷することが望ましい。

5. Hollomon and Jaffe の焼戻硬度に関する式の検討

Hollomon and Jaffe は焼戻硬度 (H) と焼戻時間 (t), 焼戻温度 ($T^{\circ}K$) の関係を $H=f[T(C+\log t)]$ で表わし、parameter $T(C+\log t)$ の値が等しい場合には硬度も等しいことを示した⁽²⁾。従つて同じ焼戻硬度を与える焼戻操作 (温度と時間) は種々あるわけであるが前述の如く 1 hr 以内の焼戻時間を用いる場合焼戻温度をいくらに選ぶべきかの大體の見當をたてるのに大變都合なので、その適應性を Fig. 4 のデータについて調べた。その結果を Fig. 5 に示

Fig. 5 Hardness vs. time-temperature parameter for tempering the quenched Ni-Cr steel.

Carbon content : 0.27%,
Constant : 16.1,
Time t in seconds,
Temperature T in deg. K.

す。このとき常数 C の値は Hollomon の提出している式⁽³⁾ $C=17.7-5.8 \times (C\%)$ から求めた値 16.1 を用いた。Fig. 5 によると各点は大體一曲線上にあり Hollomon の説が適合するようである。なお圖中で parameter の値が 15000~17000 の範囲でデータの散亂が著しいが、これは Fig. 4 で 525° と 550° の間で急激な軟化が起つてることによるものであり、Fig. 5 の曲線 B を形成しているデータはすべて 550° 焼戻のものである。従つて急激軟化のところでは Hollomon の式はその精度がわるくなるようである。

6. 急冷温度と衝撃値の関係

Fig. 1 から明らかな如く 575~650° で焼戻後急冷した試料と徐冷した試料とでは常溫衝撃値に著しい差が生じ、急冷試料で高く徐冷試料で異常に小さい。この第二焼戻脆

(2) J. H. Hollomon and Jaffe. AIME Iron Steel Div., (1945), 223.

(3) J. H. Hollomon and Jaffe, AIME, Iron Steel Div., (1945), 234.

性が徐冷中どんな様子で進行していくかを調べるために、油焼入した試料を 650° で 2, 4, 6 hr 焼戻した後爐冷し、爐冷途中で試料を取り出して水中に急冷して、その急冷温度と衝撃値の関係を求めた。その結果を Fig. 6 に示す。これ

Fig. 6 Relation between Charpy's impact test value and quenching temperature after furnace-cooling.

Fig. 7 (a), (b), (c). Schematic illustration of Fig. 6.

によると 650° から 600° まで徐冷した試料では全く脆化は起つていないので、600° 以下に徐冷すると急激に衝撃値が小さくなる。この急激な衝撃値の減少は次のように考

して遷移温度が高くなる⁽⁴⁾ものとする。かゝる場合、各試料を 20° で試験すると Fig. 7 (a) の点線と各曲線の交点の値が得られ、急冷温度と衝撃値の関係を求めると Fig. 7 (b) の如くなるわけである。従つて温度-衝撃値曲線の形状や試験温度が変化すると Fig. 6 も變るのではないかと思われる。また從來からの溶解度曲線 Fig. 7(c) を用いて考えると 650° 焼戻後 600° まで極めて徐々に爐冷してから水冷した試料は b_4c_4 に相當する第二相が析出しており、急冷温度が 550°, 500° と低くなるにつれて析出量は b_3c_3 , b_2c_2 と増し、この析出量に應じて試験温度-衝撃値曲線が次第に高温側に移動するものと考えられる。また 650° 焼戻後水冷した靱性試料を 550° で長時間再加熱して急冷したものは組織的には α -固溶體から第二相が b_3c_3 だけ析出しており、前記の 650° 焼戻後 550° まで爐冷してから水冷した試料と組織的には全く同じ状態になっている筈であるから、Fig. 6 は爐冷速度を十分に小さくすれば Greaves and Jones の平衡衝撃値曲線⁽⁵⁾ と一致するものと思われる。

IV. 結 論

- (1) Ni-Cr 鋼第 2 種について種々の焼戻条件における焼戻硬度-衝撃値曲線を求めた。それによると焼戻時間が 1 hr 以下のときは第一焼戻脆性は殆んど現われない。
- (2) 525° の焼戻で第一焼戻脆性が如何に進行するかを調べた。それによると脆化は 2 hr まで急速に進行しそれ以後は餘り變化しない。
- (3) 焼戻による軟化は 30 min でその約 85% を完了し、それ以上の焼戻は餘り効果がない。従つてこの鋼材ではすべての温度域で 1 hr 以下の短時間焼戻後、急冷すると焼戻脆性が防止出来る。
- (4) Hollomon and Jaffe の焼戻硬度に関する説はこの鋼材にも良く適合する。
- (5) 我々の求めた急冷温度-衝撃値曲線は從來の平衡衝撃値曲線と理論上一致することを示した。

終りに本實驗遂行にあたつて終始御指導御激励下さいました廣大山本 博教授、東京工大井誠太博士の御好意に對して衷心より感謝いたします。また熱心に實驗を手傳つて下さつた當時學生の川村裕三、清水英雄兩君に謝意を表します。

(4) 新制金屬講座材料篇鐵鋼 (II), (1955), 191.

(5) R. H. Greaves and Jones, Iron & Steel Inst., III (1925), No. 231 ; 門間, 鋼の焼戻脆性, (本會) (1954), 3.