0.7% C 鋼 の 加 工 焼 入 に つ い て

中村 衛* 浅村 均* 山中久彦*

Mamoru Nakamura, Hitoshi Asamura and Kyûhiko Yamanaka : The Study on Worked Quenching of 0.7% Carbon Steel. A 0.7% carbon steel was used to investigate the strengthening ratio and the mode of strengthening in the worked and quenched steel, as compared with the conventionally heat treated steel. The 0.7% carbon steel was worked over the temperature range 800°~1200°C and immediately quenched into water. Then, the hardness of the worked and quenched steel and the variation of hardness after subsequent tempering treatment were measured by the Rockwell hardness tester. And the effect of hot working prior to quenching upon the thermal dilatation of the worked and quenched steel was investigated by means of a differential dilatometer. The results obtained are summarized as follows :

(1) Hardness of the worked specimens of austenite at 900°~1200°C increased gradually as the working ratio increased.

(2) By tempering the worked and quenched steel for 1 hr at the temperature range 100°~700°C, its hardness began to decrease at the tempering temperature of 110°C. However, the hardness of the worked and quenched steel after tempering was higher than that of the unworked and quenched steel.

(3) The amount of contraction in the dilatation curves at 180°C decreased gradually as the working ratio increased in the worked and quenched steel.

(4) It was observed that the contraction ratio in the dilatation curves of the worked and quenched steel was smaller than that of the unworked and quenched steel after isothermal heating at 122°, 150° and 200°C respectively.

(Received May 16, 1968)

I. 結 言

鋼の加工熱処理法は種々あるが、中でも鋼を Ac_3 点以上の高温で加工後焼入れする加工焼入は、いままでに主として中炭素鋼につき研究された^{(1)~(3)}。われわれも構造用炭素鋼を用いて加工焼入し、さらに高温焼戻後において普通焼入焼戻しにくらべると、相当の強度と靱さの改善ができることが特長であつて、加工焼入のままの強度または硬度は、必ずしも普通焼入より優れているものでないことを指摘した^{(4) (5)}。

上述のような加工熱処理は、最近低炭素低合金鋼においても適用され、合金元素の添加された硬化能のよい鋼の場合に一層有効であるという報告がある⁽⁶⁾。

また、硬化能のよい中炭素合金鋼を 900°C で圧延後焼入れすると、焼入れのままおよび低温焼戻しの状態で普通焼入より強靱化するという研究もあるが⁽⁷⁾、本邦では硬化能のよい鋼についての研究が少ない。したがつて、今回は硬化能のよい 0.7% C 鋼を用い加工焼入し、中炭素鋼の場合⁽⁴⁾と同様、加工焼入しさらに高温焼戻しの状態で、普通焼入焼戻しに比べて強化されるという特性の再現と、その原因を追究し、なおさらに加工焼入した試料の低温焼戻挙動を普通焼入と比較し、焼入性におよぼす高温加工の影響などを考慮して、主としてその焼入直後および低温焼戻状態での強化の原因を検討した。

* 大阪府立工業奨励館 (Industrial Research Institute, Osaka Prefecture, Osaka)

(1) Ye. N. Sokolov and V. D. Sadovskiy : Phys. Met. and Metallog., **19** (1965), 67.

(2) Ye. N. Sokolov, Yu. P. Surkov and D. I. Gurfel : ibid., **20** (1965), 83.

(3) 塩谷, 山田, 稲田 : 本誌, **31** (1967), 347.

(4) 中村, 浅村, 山中 : 本誌, **32** (1968), 31.

(5) 中村, 浅村, 山中 : 大阪府立工業奨励館報告, No. 41 (1967), 1.

(6) A. W. Klisowski, E. A. Loria and C. A. Beiser : Trans. ASM, **58** (1965), 489; **59** (1966), 588.

(7) L. Hyspecká and K. Mazanec : J. Iron Steel Inst., **205** (1967), 1261.

II. 試 料 お よび 実 験 方 法

実験に使用した試料は、4.2 mm ϕ の線材であり、その化学組成は 0.7% C, 0.31% Mn, 0.26% Si, 0.018% P, 0.022% S である。この線材を約 100 mm に切断し、800°C で 1/2 hr 焼鈍して実験に使用した。

まず試料を 800°C 以上 1200°C 以下で 10 min オーステナイト化したのち、ただちに圧延加工 (各試料はすべて 1 回通過) して水焼入れした。加熱雰囲気はとくにことわらないかぎり空気中である。このようにして作られた試料の硬度をロックウェル硬度計 C スケールで測定し、加工度および加工温度による焼入硬度の変化、およびそれらを焼戻したときの硬度の変化、ならびに焼戻し差熱膨張曲線を求めた。なおこの実験での加工度は、(圧延前の直径-圧延後両圧延面間の巾)/圧延前の直径 $\times 100$ (%) で表示することにした。また示差熱膨張曲線の求め方は前報⁽⁴⁾と同様であるが、さらに等温での熱膨張曲線をも求めた。その求め方は、あらかじめ試料を取り付けた示差熱膨張計を一定の温度に保持された炉の中に装入し、時間による長さの変化をよみとつた。そのさい試料が所定の温度 (炉の温度) に達するまでに 15~18 分を要した。

III. 実 験 結 果 お よび 考 察

1. 加工 焼 入 に お ける 焼 入 硬 度 と 加 工 度 の 関 係 に つ い て

加工開始温度が 800°C 以上 1200°C 以下で、種々に加工度を変えて加工水焼入れし、その焼入直後の硬度を測定した結果、加工開始温度が 800°C の場合は、加工焼入直後の硬度が普通焼入より低い結果となつた。これは加工開始温度が 800°C と低いため加工後試料の温度が低下したためと考えられる。しかし 900°C 以上で加工焼入すると、Fig.1

Fig.1 Effect of work on hardness of 0.7% C steel

に示すようにいずれも加工度の増加とともに焼入硬度が上昇した。

このように加工焼入した場合、マルテンサイト変態を起こすのに必要な高い焼入温度と大きな冷却速度が与えられると、加工しない場合より高い焼入硬度が得られた。もちろん、加工焼入の場合、加工後試料の温度の低下が認められるので、焼入温度が低くなり、そのために焼入硬度が高くなるとも考えられる。しかし焼入温度が低下すればそれだけ冷却速度が小さくなり、また高いオーステナイト化温度、たとえば 1200°C から加工せず、単に焼入温度のみを (たとえば 850°C に) 下げただけでは Fig.1 に示した結果のように著しい効果 (高い焼入硬度) は得られないと思われる⁽⁸⁾。

2. 加工 焼 入 し た 鋼 の 焼 戻 温 度 に よ る 硬 度 の 変 化

試料を 800°C 以上 1200°C 以下でオーステナイト化したのち、その温度で加工後水焼入れしたものを、さらに 100°C 以上 700°C 以下で 1 hr 焼戻し、ロックウェル C 硬度を求めた。Fig.2 は 800°C で 45.2% 加工後水焼入れした場合である。焼入のままの硬度は普通焼入の硬度より低いのであるが、焼戻した場合焼戻温度が 300°C 以上になると逆に加工焼入した場合の硬度は普通焼入の硬度より高くなり、この状態は焼戻温度が 650°C になつても保持された。この現象は加工焼入の特長であつて、加工焼入した鋼の耐焼戻性が大きいのである。0.47% C 鋼を加工焼入した場合にもこの耐焼戻性の大きいことはすでに述べた⁽⁴⁾。また 1.5% Mn を含む 0.41% C 鋼では、この耐焼戻性は一層顕著に現われた⁽⁶⁾。

加工温度が 900°C 以上になると、焼入直後の硬度は普通

Fig.2 Relation between hardness and tempering temperature in both of worked and W.Q. and unworked and W.Q., Tempered for 1 hr at the indicated temperature

(8) 中村, 浅村: 大阪府立工業奨励館報告, No.29 (1963), 8.

焼入より高いので、これを焼戻しするとやはり加工焼入した場合の硬度は全焼戻温度範囲にわたり普通焼入したもの

Fig.3 Relation between hardness and tempering temperature in both of worked and W.Q. and unworked and W.Q., Tempered for 1 hr at the indicated temperature

より高い。その結果は Fig.3(a), (b), (c), (d) に示した。

つぎに 900°C 以上 1200°C 以下で、約 61% 加工して焼入した鋼をさらに 150° および 200°C で、1 hr 以上 30 hr 以内に種々時間を変えて焼戻しその硬さを測定した。求めた結果をそれぞれ Fig.4, 5 に示した。加工焼入したものは

Fig.4 Relation between hardness and tempering time (hr) in both of worked and W.Q. and unworked and W.Q., Tempering temperature was 150°C

普通焼入より硬度が高く、かつ両者の硬度の差は加工温度が高いほど大きい。また、焼戻温度では 200°C 焼戻した場

合、両者の硬度の差が大きくなった。しかし、いずれも加工焼入した鋼の硬度は普通焼入に比べて高く、低温焼戻した状態においても、十分加工の効果が発揮されることがわかった。

3. 加工焼入した鋼の焼戻し差熱膨張変化について

加工焼入した鋼の焼戻し差熱膨張変化を調べたが、一定の加工温度で加工度を変えた場合、加工度の増加とともに焼戻過程の第 1 段収縮が少なくなった。この現象は、加工温度が 900°C 以上 1200°C 以下の場合のすべてが同じ傾向を示し、前報⁽⁴⁾の 0.47% C 鋼の場合と同様であるが、本実験の方が変化が大きく現われ明瞭である。Fig.6, 7 はこの変化を示したもので、さらに焼戻温度 180°C における収縮量を図から測定し、加工度に対して表わしたのが Fig.8 である。この図から上述のことが理解される。また 180°C における収縮量は加工温度が 900°C の場合、低加工度域で最も大きく、加工温度の上昇とともに少なくなった。しかし加工度が大きくなればその傾向は明瞭に表われない。Fig.8 のように加工度とともに焼戻し差熱膨張曲線の第 1 段収縮量が減少するのは、焼戻しにさいしてマルテンサイトの分解が加工しない場合に比べて速やかでないことに関連する。その結果加工焼入直後に高い硬度を示すにもかかわらず、焼戻後においても硬度の減少が少ないものと考えられる。このことは、オーステナイトの高温加工の効果が焼入れによつて常温に凍結されたことを裏づけるものである。ここで仮にオーステナイトの加工によつて単に焼入性のみが向上するものであると考えるならば⁽⁹⁾、前述した焼戻しの第 1 段の収縮はさらに大きく現われなければならないと考えられ、前述の実験結果に矛盾することになる。

つぎに、加工焼入した鋼を 3.3°C/min の加熱速度で 600°C まで加熱し、焼戻し差熱膨張変化を求めた。Fig.9(a), (a') は 900°C で 57.1% 加工後水冷したものおよび普通焼入したものの焼戻し差熱膨張曲線である。加工焼入した場合

の収縮の開始は、普通焼入したものより約 30°C 高温側にずれ、かつ第 1 段収縮は前述の場合と同様に少ない。また焼戻しの第 2 段階の膨張は両者とも同程度の大きさである。また第 3 および第 4 段階の収縮率も両者において大差はないが、収縮量では普通焼入の方が大きい。これは第 1 段階の大きな収縮が影響しているためと思われる。なお、600°C まで加熱したのち両試料につきロックウェル C 硬度を測定し、曲線の右端に記入して示した。それによると、加工焼入したもので Rc 36.2 となり、一方普通焼入したものは Rc 34.5 で、前者が Rc 1.7 だけ高い。

つぎに加工を 1100° および 1200°C と高温で行なった場合の焼戻し差熱膨張曲線を Fig.9(b), (b') および (9) 前田、阿部、遠藤：本誌、25(1963)、415。

Fig. 5 Relation between hardness and tempering time (hr) in both of worked and W.Q. and unworked and W.Q. Tempering temperature was 200°C

Fig. 6 Differential dilatation curves of worked and W.Q. steels. Working temperature and working ratio were indicated in figure

よび Fig. 10 に加工しない場合と比較して示したが、加工焼入した場合の収縮の開始は約 30°C 高温寄りにずれ、その第 1 段の収縮率は普通焼入に比べて小さく、したがって収縮量も少ない。これは前述の 900°C 加工の場合と同じ傾向である。なお焼戻しの第 2 段階は両者とも同程度で変化は少ない。さらに焼戻しの第 3 および第 4 段階をみると、加工焼入した場合の収縮率は普通焼入に比べると同程度かあるいはやや大きい場合もある。これは高温(約 400°C 以上)での焼戻において、 Fe_3C が多数析出するためと考えられる。なお、600°C まで加熱後のロックウェル C 硬さは焼戻曲線の右端に示したが、加工焼入したものの硬度は普通焼入に比べてやはり高い。

結局 900°C 以上 1200°C 以下で強加工を与え焼入れした場合の焼戻過程をみると、焼戻しの第 1 段階の収縮変化率は普通焼入に比べて小さく、焼戻しされにくいようである。

さらに焼戻しの第 3 および第 4 段階にまでひきつづいて焼戻しが持続する。

加工焼入し、600°C まで加熱した後の硬度は普通焼入に比べて Rc で約 2 だけ高くなるという特性を示し、この現象は 0.47% C 鋼と共通するものである。

4. 加工焼入した鋼の焼戻時間による示差熱膨張変化

加工後水焼入したものと同焼入したものをさらに 122°, 150° 及び 200°C で焼戻し、その時間による試料の長さの変化を示差熱膨張

Fig. 7 Differential dilatation curves of worked and W.Q. steels. Working temperature and working ratio were indicated in figure

Fig. 8 Relation between the amount of contraction of differential dilatation curves 180°C and the hot working ratio in worked and W.Q. steels

計により調べた。その結果の代表的なものとして 1100°C, 63% 加工焼入したものおよび普通焼入した場合を Fig. 11

Fig. 9 Differential dilatation curves of worked and W.Q. steels. Working temperature and working ratio were indicated in figure

Fig. 10 Differential dilatation curves of worked and W.Q. steels. Working temperature and working ratio were indicated in figure

に示した。これら曲線は、加熱の開始時では一定のスケールのよみ (200 mm) から出発しているが、数分後に一旦膨張し極大値を経て収縮を示している。時間の経過と収縮変化を加工焼入および普通焼入につき比較すると、後者の収縮率が大きく、各焼入温度別の曲線が約 300 min に達したとき、一定の値に収斂している。これに対して加工焼入した場合、一定値への収斂変化がおくれている。しかし 300 min 以上の長時間側においては、一定の値に近づく傾向は認められる。なお、つぎに普通焼入した場合の収縮速度を

検討してみた。いま焼入時間 300 min で一定の値にほぼ収斂しているものと考えて、全変化の約 9 割変化したときの

Fig. 11 Relation between differential dilatation and tempering time (min) in both of worked and W.Q. and unworked and W.Q. Tempering temperature was indicated in figure

時間と各焼入温度から (アレニウスの速度式にしたがったため)、この焼入過程の活性化エネルギーを求めると約 6800 cal/mol が得られた。加工焼入した場合は、未だ一定値に収斂していないので正確に求められないが、その延長上にのるものと仮定して、前と同様に求めると約 16000 cal/mol となった。

IV. 結 言

以上にのべた 0.7% C 鋼を加工焼入した実験結果を要約するとつぎのとおりである。

(1) 加工温度 800°C 以上 1200°C 以下で加工焼入した場合、800°C 加工焼入を除いて他の場合は、加工度の増加とともに焼入硬度は増加した。しかし 800°C 加工焼入の場合は、普通焼入より高い焼入硬度が得られなかった。

(2) 加工焼入したのち、100°C 以上 700°C 以下で 1 hr 焼入すると、加工温度が 900°C 以上 1200°C 以下の場合、全焼入温度範囲にわたり加工焼入したものの硬度は普通焼入したものより高い。

(3) 800°C 加工焼入した場合、焼入温度が 300°C 以上になると普通焼入の場合より硬度が高くなり、しかも全加工温度のなかで最高の焼入硬度が得られた。

(4) 加工焼入のままの硬度が普通焼入より高い場合、150° および 200°C で長時間焼入したのちも、なお加工焼入したものの硬度は普通焼入よりすぐれていた。

(5) 加工焼入した鋼の焼入示差熱膨張曲線を求めた結果、焼入過程の第 1 段の収縮は加工度とともに減少し、収縮量が少ない。また、加工焼入した場合、焼入過程の第 3, 4 段階にまでひきつづき大きな収縮変化を示した。

(6) 加工焼入した鋼を 122°, 150° および 200°C の一定温度で長時間加熱し加熱時間による焼入示差熱膨張曲線を求めた結果、やはり加工焼入した場合の収縮率は普通焼入したものより小さいことがわかった。