

# 加工熱処理による12Crステンレス鋼 マルテンサイトの強化と焼もどし軟化抵抗

大森宮次郎\*, 山崎 明\*

(昭和59年8月30日受理)

## Strengthening of Martensite of 12Cr Stainless Steel by Thermomechanical Treatment and Softening Resistance of the Martensite to Tempering

MIYAJIRO OHMORI, AKIRA YAMAZAKI

*Abstract*— A 12 Cr stainless steel was rolled up to 48% reduction in thickness at a temperature of 550°C in austenite range where work hardening would markedly develop and at temperatures from 780 to 900°C where recovery might immediately occur, and transformed into martensite by quenching. Then, the strengthening of martensite and the softening resistance to tempering at low and high temperatures have been evaluated by hardness testing.

The martensite processed by ausforming in the super-cooled austenite range has shown the greatest strengthening. The martensite produced by modified ausforming in the stable austenite region cannot be strengthened in the range of low reduction in thickness, whereas it is substantially hardened in higher reduction range.

The ausformed martensite has shown an immense softening resistance against tempering at tempering temperatures of 500°C or below. The softening resistance of the modified-ausformed martensite is lower than that of the ausformed in the range of low tempering temperature. In the higher temperature range of tempering, however, the modified-ausformed material gives significant softening resistance to tempering. In every case, higher reduction in thickness in thermomechanical treatment always provides greater softening resistance to tempering.

### 1. 緒 言

オースフォームに端を発し、数多くの加工熱処理法が<sup>1)</sup>開発され今日に至っている。鍛造焼入れ<sup>2)</sup>、加工焼入れ<sup>3)</sup>、高温加工熱処理<sup>4)</sup>、改良オースフォームあるいは直接焼入れ<sup>5)</sup>等<sup>6)</sup>は、いずれもオースフォームを基本として派生したものである。これらの加工熱処理は、名称こそ異なるが、いずれも鋼のオーステナイトに塑性加工を行い、マルテンサイト変態を起こさせる処理である。鋼はこれらの加工熱処理によって、その強度やじん性を変え、少なから

ず材料性能を向上するようになる。しかるに、その場合、オーステナイトの加工条件によってオーステナイトが、加工硬化状態、回復状態、再結晶状態あるいはそれらの混合状態<sup>7), 8)</sup>がえられ、変態後のマルテンサイトの性質に差異を生じる。すなわち、マルテンサイトの性質は、母相のオーステナイトの組織状態に強く影響されるのである。マルテンサイトは、通常、焼もどしを施して使用するが、焼もどし後の鋼の性質はまた、そのマルテンサイトの内部組織に強い関連性をもっている。したがって、オーステナイトの塑性加工と続くマルテンサイト変態を組み合わせる加工熱処理は、加工オーステナイトの組織状態か

\* 茨城大学工学部機械工学第二学科 (日立市中成沢町)

らマルテンサイトの性質, さらに焼もどし後の特性まで一貫した検討が不可欠となる。逆にこのような一貫した検討を行うことにより, 鋼の強じん化を得るための組織制御プロセスが明らかになるであろう。

本研究は, このような観点から, オーステナイトの加工とマルテンサイト変態を組み合わせた加工熱処理の効果を調べたものである。本報告は, オーステナイトの加工硬化状態および回復状態からマルテンサイト変態を起こさせた場合のマルテンサイトの強化とその焼もどし軟化抵抗を検討したものである。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験材料

本研究には, 広い温度範囲でオーステナイトを十分に加工できる鋼を必要とするため, 実験にはマルテンサイト系である 12Cr ステンレス鋼 (SUS403) を用いた。その化学組成を Table 1 に示す。直径 3.2 mm の市販の 12Cr 鋼で, これを温度 1000 °C で所要の厚さに熱間圧延して使用した。使用前に温度 900 °C で 1 時間保持して焼なましを行った。

Table 1 Chemical composition of 12 Cr stainless steel used (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
SUS403	0.14	0.27	0.44	0.022	0.018	0.16	11.79	Bal.

### 2.2 加工熱処理

本実験で行った加工熱処理のプロセスを Fig. 1 に示す。同図(a)はオースフォーム処理である。鋼を温度 950 °C で 25 分間オーステナイト化し, 空冷して温度 550 °C まで冷却し, この温度に保持した炉中に 5 分間保ち, 圧延により 1 パスで塑性変形を加えて焼入れした。加工度は, 厚さ減少率で 13, 28% および 48% である。また温度 550 °C で 48% 加工した試片を, 加工後その温度に 5, 10 および 30 分間保持してから焼入れした試片も準備した。これは 550 °C なる温度で加工したオーステナイトを, この温度に保持することによりオーステナイト中に静的回復が生じて軟化するか否かを調べるための処理である。

同図(b)は改良オースフォームであり, オーステナイト化温度 950 °C より空冷して, 温度 900, 840 °C および 780 °C に到達したときに圧延加工を行い, ただちに焼

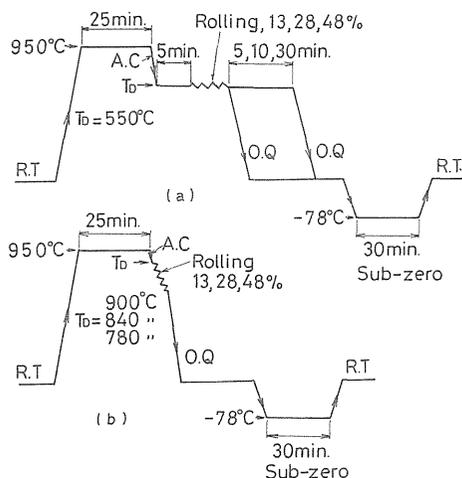


Fig. 1 Schematic diagram of thermomechanical treatment.

(a) ausforming  
(b) modified ausforming

入れするものである。加工開始温度は, 輻射温度計を用いて測定した。

塑性加工を行うのに使用した圧延機は, ロール直径 150mm の 2 段式のもので, ロール周速 0.044m/sec で圧延した。

また, 加工熱処理の効果を比較する基準とするため, オーステナイト化温度 950 °C より加工せずにただちに焼入れした通常の焼入れ試片も準備した。

なお, 焼入れは, すべての場合油冷とし, 焼入れ後, 温度 -78 °C に 30 分間保持してサブゼロ処理を行った。

以上の熱処理では, オーステナイト化条件をすべて同一にとっているので, マルテンサイト変態後のマルテンサイトの強度は, 加工温度と加工度のみによって定まることになる。

マルテンサイトの焼もどしは, 温度 200 ~ 700 °C で 1 時間の保持で行い, 焼もどし後は試片を水冷した。

### 2.3 試験方法

サブゼロ処理および焼もどし処理段階で硬さ測定を行い, マルテンサイトおよび焼もどし状態の強度を調べた。硬さ試験は, ビッカース試験機を用い, 試験荷重 20 kg, 荷重保持時間 30 秒で測定した。硬さ測定は, 試片の圧延方向縦断面の中央部で行った。

また, 加工中にオーステナイトの再結晶が生じないことを確認するため, オーステナイト組織を観察した。観

察は, 温度300℃で1時間加熱後, 炉冷した試片を用い, 硬さ測定面と同一面で行った。

### 3. 実験結果と検討

#### 3.1 マルテンサイトの強化

Fig. 2 は, サブゼロ処理後のマルテンサイトの硬さと加工度の関係を示す。加工度0%は, 通常の焼入れ (CHT) を行った試片のマルテンサイトの値である。マルテンサイトの硬さは, オースフォーム材 (加工温度550℃) では加工度とともに大きく上昇するが, 改良オースフォーム材 (加工温度780~900℃) では, 加工度13%までは強化が得られず, それ以上の加工度では, 加工度とともに強化するようになる。

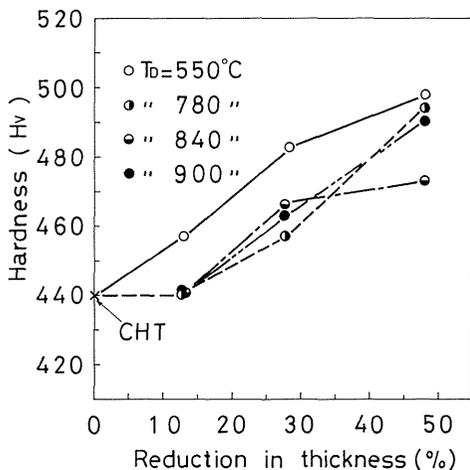


Fig. 2 Effect of deformation of austenite at temperatures from 550 to 900°C on the hardness after transformation to martensite.

Fig. 3 は, 通常焼入れ材を基準としたマルテンサイトの強化度

$$R_M = \frac{H_{TM} - H_{CM}}{H_{CM}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

におよぼす加工温度および加工度の影響を示す。ただし,  $H_{TM}$  は加工熱処理材の硬さ,  $H_{CM}$  は通常焼入れ材の硬さを示す。オースフォーム材は, マルテンサイトの強化度が加工度にはほぼ比例して上昇し, 加工度4.8%で強化度約1.3%となっている。改良オースフォーム材では, マルテンサイトの強化度は, 加工度1.3%以上では

ば直線の関係で上昇し, 加工度4.8%で約7~12%の値となり, 高加工ではオースフォーム材に匹敵する強化がえられる。

Fig. 4 は, 温度900℃で改良オースフォームした試片のオーステナイト組織例である。オーステナイト結晶粒は, 図に示すように加工方向 (左右方向) に長くのびた形状を示すが, 再結晶を起こした形跡は全く観察されない。このように温度900℃で加工した場合にもオーステナイトに再結晶が生じないので, この温度より低い温度で加工熱処理した試片では, オーステナイトの再結晶は全く起こらないと考えてよいであろう。

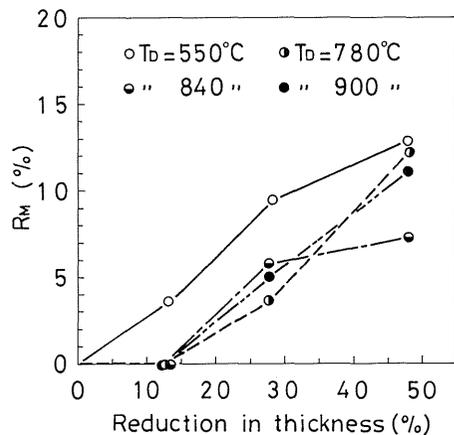


Fig. 3 The rate of hardness increase in martensite by thermomechanical treatment.



Rolling direction  $\longleftrightarrow$  20  $\mu$

Fig. 4 Prior austenite grain structure in specimen deformed 48% at 900°C. Logitudinal section.

Fig. 5 に温度 550°C でオースフォームし、加工後その温度に 5~30 分間保持して焼入れしたマルテンサイトの硬さを示す。加工後ただちに焼入れした試片(0 秒保持)より保持した試片はわずかに硬さが上昇し、時効現象を示しているが、軟化することはない。このことから、温度 550°C で加工し、ただちに焼入れした試片には回復がほとんど起こっていないものと考えることができる。また、回復が生じたにしても無視できる程度のもので考えてよいであろう。したがって、温度 550°C でオースフォームした試片のマルテンサイトの硬さは、加工中の回復現象をほとんど含まないオーステナイトから焼入れした場合の硬さ値とみなすことができる。そこで、温度 780~900°C で改良オースフォームしたマルテンサイトの硬さが、上述のオースフォームしたマルテンサイトの硬さに比較して低いのは、加工中あるいは加工後ただちにオーステナイト中に生ずる回復に起因するものと考えてよいであろう。加工中に生ずるオーステナイト中の動的回復は、加工によって増殖された転位やセル構造が、消滅や再起列してポリゴン化を生じたり、あるいは亜結晶粒を形成したりする場合の軟化現象である。

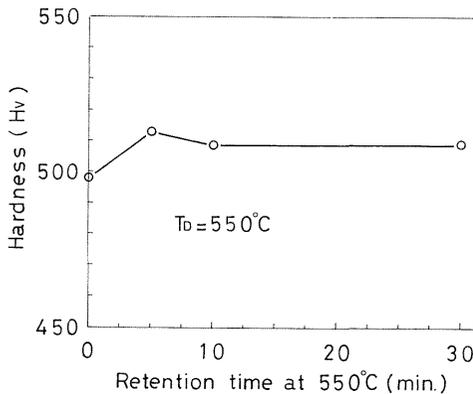


Fig. 5 Effect of retention time at 550°C after deforming at same temperature on the hardness after transformation to martensite.

ここで温度 550°C で加工した試片のマルテンサイトの硬さを  $H_{LM}$ 、温度 780~900°C で加工した試片のマルテンサイトの硬さを  $H_{HM}$ 、また通常焼入れ材のマルテンサイトの硬さを  $H_{CM}$  とし、同じ加工度の試片について次の量  $R_D$  を考えよう。

$$R_D = \frac{H_{HM} - H_{LM}}{H_{LM} - H_{CM}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

( $H_{LM} - H_{CM}$ ) は、準安定オーステナイト域の温度 550°C でオースフォームしたマルテンサイトの通常焼入れマルテンサイトに対する硬化量であり、前述のように、この加工温度ではオーステナイトに回復が生じないとみなすことができるから、この値は、回復が生じない場合のマルテンサイトの全硬化量となる。しかるに ( $H_{HM} - H_{LM}$ ) は、オースフォーム材(温度 550°C 加工)に対する改良オースフォーム材マルテンサイトの硬さ変化量、すなわち軟化量である。前述のように、改良オースフォーム中にはオーステナイト中に回復のみが生ずるので、( $H_{HM} - H_{LM}$ ) の値は、回復 0 のオースフォーム材に対する改良オースフォーム材の回復量をマルテンサイトの硬さで表現したものである。したがって、 $R_D$  は、改良オースフォーム中に生ずる回復率を表わすことになる。回復率  $R_D$  の加工温度および加工度による変化を Fig. 6 に示す。加工度 13% では、加工の効果がすべて回復するが、その後加工度を増すと、回復が急激に起こりにくくなる傾向を示している。

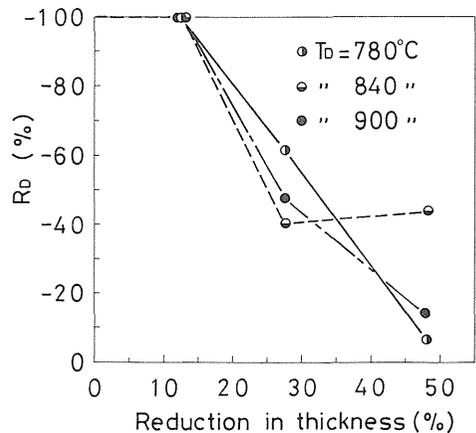


Fig. 6 The rate of hardness decrease in modified-ausformed martensite to ausformed martensite.

### 3.2 焼もどしによる硬さ変化

Fig. 7~9 に通常焼入れおよび加工熱処理材の焼もどしによる硬さ変化を示す。温度 200~500°C で焼もどした場合、加工熱処理による強化が維持され、著しく高い硬さを示し、加工温度の低いほど焼もどし硬さが高い。しかるに焼もどし温度 550~700°C では、いずれの場合も急激に軟化する。

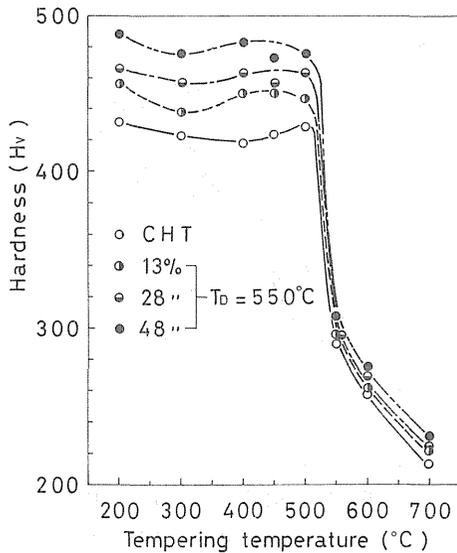


Fig. 7 Variation in hardness with the tempering temperature in ausformed steel.

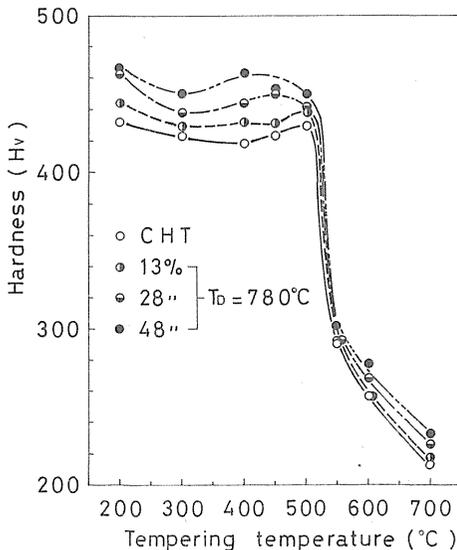


Fig. 8 Variation in hardness with the tempering temperature in specimen modified-ausformed at 780°C.

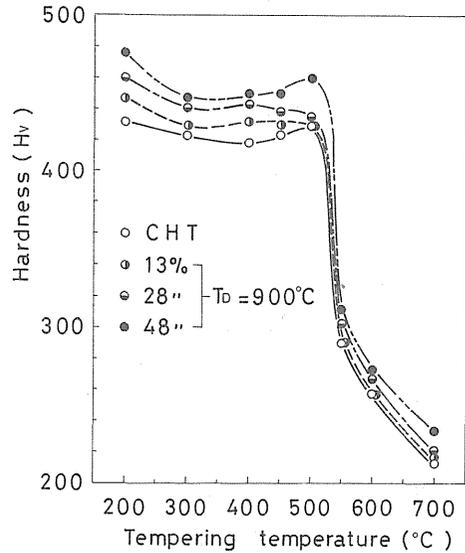


Fig. 9 Variation in hardness with the tempering temperature in specimen modified-ausformed at 900°C.

### 3.3 結果の検討

- (1) 焼もどしによるマルテンサイトの軟化率について・  
焼もどしによるマルテンサイトの軟化率  $R_S$  は次式で与えられよう。

$$R_S = \frac{H_M - H_T}{H_M} \times 100 (\%) \quad (3)$$

ここで  $H_M$  はマルテンサイトの硬さ,  $H_T$  はそれを焼もどしたときの硬さである。  $R_S$  が小さいほど焼もどしに対する軟化抵抗の大きいマルテンサイトであり, 焼もどしに対し安定性の高い組織であることを示す。加工度 48% の試片のマルテンサイトの軟化率  $R_S$  の焼もどしによる変化を Fig. 10 に示す。

焼もどし温度 200~500°C の範囲に対する結果である。ここで仮に, 加工温度 550°C および 780°C をそれぞれ準安定オーステナイトにおける低温域および高温域, また温度 840°C および 900°C を安定オーステナイトの低温域および高温域と呼ぶことにする。このとき, この焼もどし温度範囲では, 準安定および安定オーステナイトの低温域で加工した試片のマルテンサイトは, 焼もどしに対する軟化率が低く, 準安定および安定オーステナイトの高温域で加工したマルテンサイトは, 軟化しやすいとすることができる。すなわち, 両オーステナイトの低温域で 48% 加工した試片

の場合、マルテンサイトの軟化率は約5%以下であるが、高温域で加工した試片では、約6~9%の軟化率を示している。なお、通常焼入れ材のマルテンサイトは、焼もどしによる軟化率が意外に低いことがわかる。

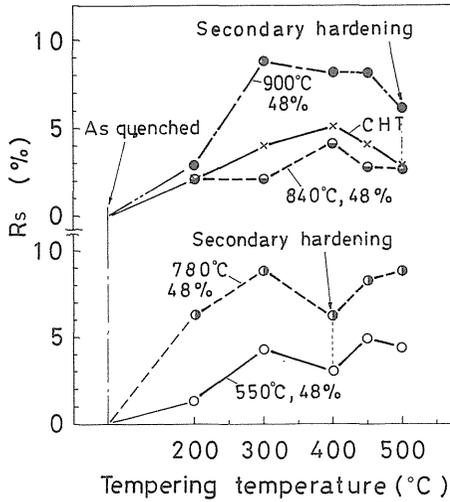


Fig. 10 Variation in the fractional hardness decrease with the tempering temperature in case of low temperature tempering.

また準安定オーステナイトの低温および高温域で加工した試片は、焼もどし温度400℃で2次硬化が最も強くあらわれている。これに対し通常焼入れ材および安定オーステナイト域で加工した試片は、焼もどし温度500℃で2次硬化が最も著しい。すなわち、準安定オーステナイト域で加工した試片は、2次硬化のピークが焼もどし温度の低温側に移動する。この原因として準安定オーステナイトの加工中に、2次硬化の原因となる炭化物が析出段階に入ることが考えられる。そのため、焼入れによって生成したマルテンサイトは著しく硬化するとともに、焼もどしによって2次硬化を示す炭化物が早期に析出するものとみることができ。これに対し安定オーステナイト域で加工する場合、炭化物の析出が起こりにくく、通常の焼入れ材と同様の2次硬化のピーク現象を示すものと考えられる。

次に、温度550~700℃の焼もどしによる軟化曲線をFig. 11に示す。この焼もどし温度範囲では、軟化率が3.0~5.5%と大きく変化する。安定オーステナイトの低温域で改良オースフォームした試片は、この焼もどし温度範囲でも軟化率が低い。これに対し準

安定オーステナイトの低温域でオースフォームした試片は、比較的大きな軟化率を示している。

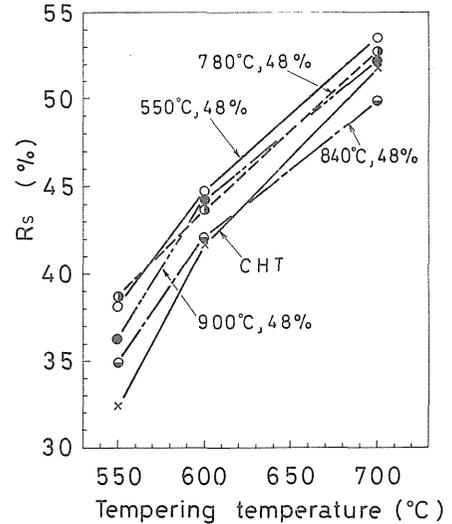


Fig. 11 Variation in the fractional hardness decrease with the tempering temperature in case of higher temperature tempering.

前述のように温度550℃でオースフォームしたマルテンサイトは、焼もどしによる2次硬化のピークが低温側に移動しており、これは、2次硬化が低温の焼もどしで終了することを意味する。そのような組織をさらに高い温度で焼もどしすると、炭化物の凝集や基地の回復が続いて早期に起こることが考えられる。このことは、高温での焼もどしに対する軟化抵抗を低くする原因となる。しかるに安定オーステナイトの低温域で改良オースフォームした試片は、通常の焼入れによるマルテンサイトと同様の焼もどし過程により軟化するものと考えられ、結果的に高温焼もどしで高い軟化抵抗を示すことになる。

- (2) 焼もどし軟化抵抗性の比較・ 通常焼入れ材の焼もどし硬さを $H_{CT}$ を基準にとり、加工熱処理材の焼もどし硬さを $H_{MT}$ とすると、焼もどし軟化抵抗 $S_R$ を次式で定義する。

$$S_R = \frac{H_{MT} - H_{CT}}{H_{CT}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

加工度48%の試片の焼もどし軟化抵抗 $S_R$ の焼もどし温度による変化をFig. 12に示す。準安定オーステナイトの低温域550℃でオースフォームした試片の

焼もどし軟化抵抗  $S_R$  は、焼もどし温度500℃以下では、約12~16%と非常に高い値を示しているが、温度550℃以上の焼もどしでは、約6~9%と低い値となる。これに対し、加工温度780℃以上で改良オースフォームした試片の焼もどし軟化抵抗  $S_R$  は、全焼もどし温度範囲で約6~10%の範囲の値をとっている。

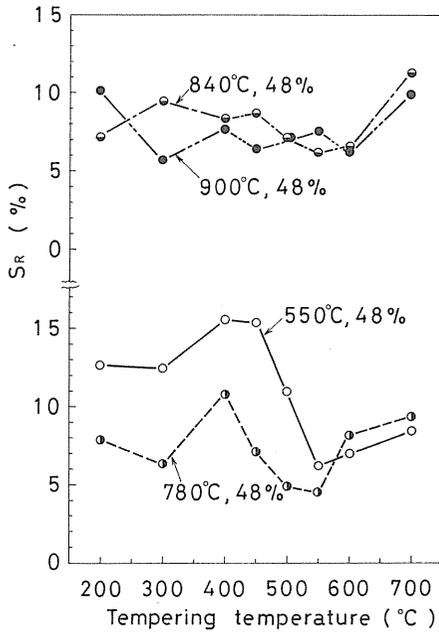


Fig. 12 The rate of hardness increase in 48%-deformed specimen after tempering.

Fig. 13は、焼もどし軟化抵抗  $S_R$  におよぼす加工度の影響を示したもので、焼もどし温度400℃および700℃の例である。焼もどし温度400℃の場合、温度550℃でオースフォームした試片は、わずかな加工で軟化抵抗  $S_R$  が急激に上昇し、以後直線的に増加する。他の加工温度の試片では、軟化抵抗  $S_R$  は、加工度とほぼ比例関係で上昇する。焼もどし温度700℃の場合、いずれの加工温度の試片も、軟化抵抗  $S_R$  は加工度に比例関係で上昇する傾向を示している。

Fig. 14は、マルテンサイトの強化度  $R_M$  と焼もどし軟化抵抗  $S_R$  の関係で、焼もどし温度400℃の例を示したものである。この例で明らかなように、マルテンサイトの強化度の大きい場合ほど焼もどしに対する軟化抵抗が大きい。

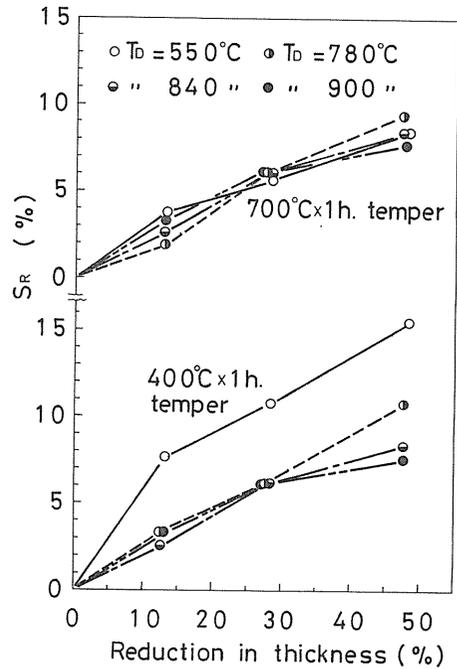


Fig. 13 Effect of deformation in thermo-mechanical treatment on improvement of tempered hardness.

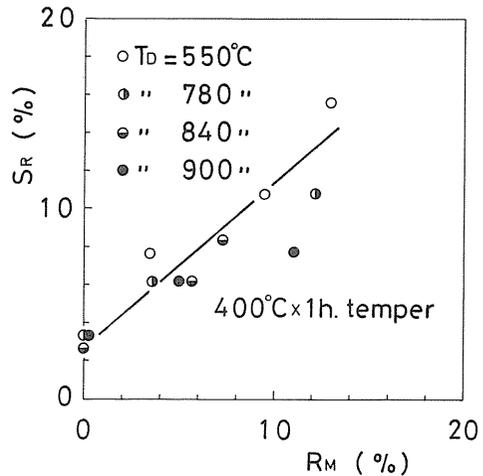


Fig. 14 Relation between strengthening of martensite and softening resistance to tempering.

#### 4. 結 論

以上の結果をまとめると次のようになる。

1. マルテンサイトの強化に関し,
  - (1) オースフォーム材(加工温度550℃)では, 加工度とほぼ直線的関係で強化し, 加工度48%で約13%の強化となる。
  - (2) 改良オースフォーム材(加工温度780~900℃)では, 加工度13%以下では強化がえられないが, 以後加工度とともに強化し, 加工度48%で約7~12%強化する。
  - (3) 改良オースフォーム材のマルテンサイトの強化度の低い現象は, 主として加工オーステナイトの回復によるものであることが推察された。
2. 焼もどしによるマルテンサイトの軟化に関し,
  - (1) 準安定および安定オーステナイトの低温域で加工した試片のマルテンサイトは, 低温焼もどし(温度500℃以下)で焼もどしによる軟化が小さく, 加工度48%の試片で約5%以下の軟化率であるが, 準安定および安定オーステナイトの高温域で加工した試片の場合, 約6~9%の軟化率となる。
  - (2) 温度550℃以上の高温焼もどしでは, いずれのマルテンサイトも軟化率が約35~54%程度まで増加するが, この場合, 準安定オーステナイトの低温域で加工した試片の場合, 軟化率が他に比較してわずかに大きい。
3. 通常焼入れ材に対する加工熱処理材の焼もどし軟化抵抗性に関し,
  - (1) オースフォーム材は, 温度500℃以下の焼もどしでは, 著しく高い軟化抵抗を示し, 加工度48%の試片で, 約12~16%の硬さ増加が得られるが,

温度550℃以上の高温焼もどしでは, 軟化抵抗は低く, 約6~9%の硬さ増加となる。

- (2) 改良オースフォーム材は, 焼もどし温度200~700℃の範囲でほぼ同程度の軟化抵抗を示し, 加工度48%の試片で約6~10%の硬さ増加となる。
- (3) 焼もどし軟化抵抗は, 加工度とほぼ直線的関係で上昇するが, オースフォーム材の強化には, 加工度の効果は特に著しい。
- (4) 焼もどし軟化抵抗は, マルテンサイトの強化度の大きい場合ほど高くなる傾向を示した。

#### 参 考 文 献

- 1) J. C. Shyne, V. F. Zackay and D. J. Schmatz, *Trans. of A. S. M.*, 52(1960), 346
- 2) 前田, 鍛造焼入れ, 日刊工業新聞社(1967), 60.
- 3) 中村, 浅村, 山中, 日本金属学会誌, 32(1968), 1052.
- 4) M. L. Bernshtein, *steel in the USSR*, 2-2(1972), 151.
- 5) R. A. Boch, W. M. Justusson, *Metal Progress*, 94(1968), 107.
- 6) たとえば小松原, 渡辺, 大谷, 鉄と鋼, 67-13(1981), S1324.
- 7) 大森, 芳賀, 中根, 山崎, 茨大工研集報, 25(1977), 69.
- 8) 大森, 中根, 山崎, 熱処理, 20(1980), 74.