

鋼の加工焼入におけるオースフォーミング効果について

田 中 義 勝*
大 島 聡 範**
岩 瀬 谷 正 男***
林 忠 夫***

An Experiment on the Ausforming effect of "Hot Work Quench Hardening"

Yoshikatu TANAKA
Toshinori ÔSHIMA
Masao IWASEYA
Tadao HAYASHI

要 旨

加工焼入した鋼について加工率と硬度の関係を調べた結果、完全焼入マルテンサイト組織であれば硬度は加工率とは無関係に一定であった。すなわち加工焼入におけるオースフォーミング効果は従来報告されているほど大きなものではなく、極めて僅かなものであることがわかった。

Synopsis

The relationship between working ratio and hardness of hot work quench hardened steel has been examined. Then the hardness of the steel is independent of working ratio if the structure is complete martensite. Therefore, ausforming effect has not so large influences as reported in the past but very small.

I 結 言

加工焼入はいわゆる加工熱処理法の一つであり、安定オーステナイト域で塑性加工を与えた後、ただちに焼入することにより鋼の機械的性質を向上させる方法である。

加工焼入の特長は鋼の焼入性を増加させることにあり、普通焼入鋼と比較して強度特性のすぐれている理由は主としてこの硬化能因子によるものと考えられる。しかし、加工によって安定オーステナイトの加工硬化結晶粒の微細化等が生ずるならば、これに伴う因子、すなわちオースフォーミングの因子による強化

についても考慮する必要がある。

従来の報告では両者を混同している向きが多いが、本質的には異なるものであるから、区別して取扱うべきであると考えられる。この両因子は相互に関連し合っているので、全く独立した形で考察することは困難であるが、完全焼入状態においては硬化能因子は飽和すると考えれば、オースフォーミング的因子だけを分離して取扱うことが可能である。

著者等は前述の立場より加工焼入のオースフォーミング的效果について実験を行なったところ、二、三の興味ある結果を得たので報告する。

II 試料および実験方法

実験に使用した試料は市販の S 10 C, S 25 C, S 55 C, SK 3, 高張力鋼 HTP の熱延材、および電解鉄を高周波炉にて真空溶解した後板状に鍛伸したも

* 講師 機械工学科

** 助教授 機械工学科

*** 技官 機械工学科

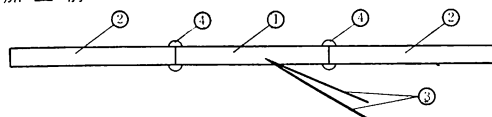
のである。各々の化学成分を第1表に示す。

第1表 試料の化学成分 (Wt %)

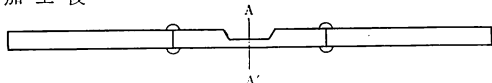
試料	C	Si	Mn	P	S
SK3	1.13	0.41	0.48	0.008	0.007
S55C	0.58	0.23	0.70	0.015	0.010
S25C	0.23	0.24	0.50	0.008	0.012
HTP	0.21	0.42	1.39	0.013	0.005
S10C	0.13	0.24	0.51	0.019	0.023
純鉄	0.004	0.004	0.001	0.004	0.005

試験片は長さ約130 mmとし、各々0%, 20%, 35%, 50%, 65%加工後の厚さが3.0 mmと一定になるように、被加工部分の断面寸法を3.0×7.3, 3.8×6.0, 4.6×4.9, 6.0×3.8, 8.6 mm^T×2.8 mm^Wの5種類に切削加工した。切削後の試験片を真空炉にてオーステナイト域に30分間加熱し650℃まで炉冷の後空冷した。その後試験片の両端に、加工焼入時における電極把持部として軟鋼棒をアーク溶接し、さらに試験片中央部附近にクロメル-アルメル熱電対を点溶接した。試験片の寸法形状を第1図に示す。

加工前



加工後



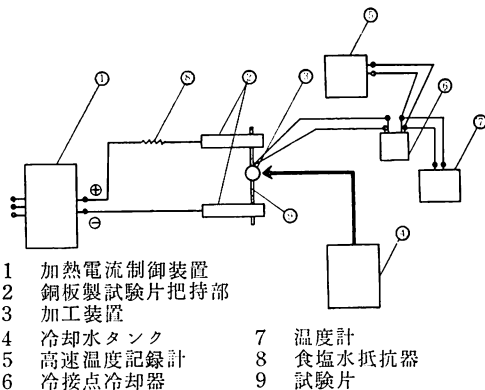
- A-A'断面
- 1 試験片
 - 2 軟鋼棒
 - 3 熱電対 (C. A)
 - 4 溶接部

第1図 試験片

加工焼入の加熱法としては、試験片に直接電流を流しその抵抗発熱によった。実験装置の概略を第2図に示す。

直接通電加熱法を用いた理由は、昇温過程から加工後焼入する瞬間まで温度を正確に測定できること。従って加工および焼入時の温度制御を正確かつ容易に行ない得るためである。加熱電流の制御には大阪変圧器製CPA-500型アーク溶接機(最大容量500A)を使用した。

加工温度は他の実験例を参考として1000℃とした。1000℃まで昇温に要する時間は約80秒、恒温保

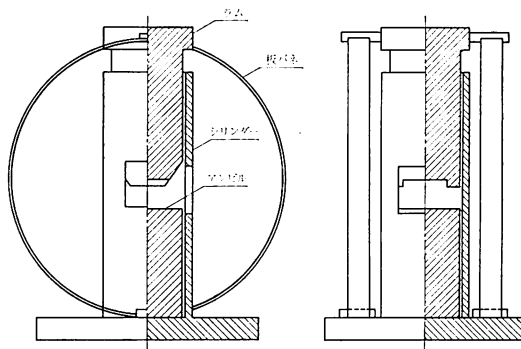


第2図 加工焼入装置概略

持に要する電流は約230 Aであった。この状態で試験片の中央部に約50mmの均熱部を生ぜしめることができた。

試験片を第2図に示したように取付けた後通電を開始し、高速温度記録計により測温記録させながら目標温度に60秒間保持した後、加熱電源を切り大ハンマーにて1ストロークで加工後ただちに水冷した。水冷にあたっては定圧タンクより流出する水を用いた。水温は約13℃、流量は200 cc/secであった。

ハンマーによる打撃で目標の加工率が得られるように特別の加工装置を使用した。装置の詳細を第3図に示す。



第3図 加工装置

加熱および冷却時においては試験片が、ラム、アンビルに接触しないようにラムは環状板バネで押上げておき、試験片はバランスウェイトによりアンビルとラムの中間に位置するようになっている。ラムの下端には高さ3 mmの当り部が設けてあるので、十分な打撃が加えられた時この部分がストッパーになり、加工後の試験片の厚さは全て3.0 mmになるようになっている。試験片把持部に取付けたハンドルを操作して打撃を加える瞬間だけ試験片をアンビルに接触させ、同時にラムに打撃を加えて加工し、加工後試験片はバラン

スウェットによりただちにアンビルから離れ、ラムは板バネに押上げられ同時に水冷開始できるようになっている。従って試験片が工具に接触するのは加工の一瞬であり、加工による試験片温度の変動は後述するように極めて僅かである。

加工前の試験片厚さを前述のように種々変化させることにより、加工後の試験片の寸法は各加工率とも $3.0\text{mmT} \times 7.5\text{mmW}$ すなわち約 23mm^2 の一定断面積となる。このようにして試験片の冷却条件は加工率に関係なく一定となる。

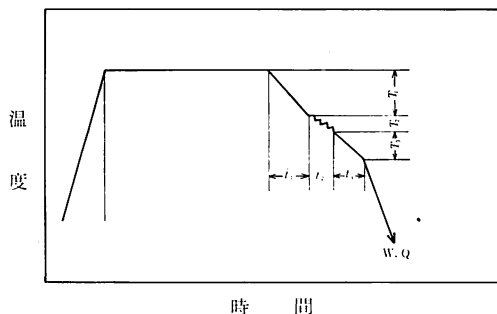
焼入後第1図の AA' 線より切断し、同図に示したように中心線に沿って3点硬度測定した。また真空炉またはオイルバスにより 100°C 以上 500°C 以下の温度範囲で焼入後の硬度も同様に測定した。硬度測定にはビッカース硬度計を使用した。

III 実験結果

III・1 加工焼入における温度変化について

本実験における特色の一つは試験片に熱電対を直接点溶接し、加熱開始から冷却までの間確実に温度測定したことである。その結果加熱終了後焼入までの温度変化を正確に把握することができた。

加工焼入における焼入までの温度変化の概念図を第4図に示す。 t_1 は加熱電源を切ってから加工開始までの時間、 t_2 は加工に要する時間、 t_3 は加工終了後冷却開始までの時間である。また T_1 、 T_2 、 T_3 はそれぞれ t_1 、 t_2 、 t_3 なる時間内に变化する温度である。高速温度記録計により測定した結果、 t_1 は約 0.5 秒、 t_2 は 0.1 秒以下、 t_3 は約 0.5 秒であった。また T_1 は約 12°C 、 T_2 は約 0°C 、 T_3 は約 5°C であった。従って各々の冷却速度を v_1 、 v_2 、 v_3 とすれば、 $v_1 = T_1/t_1 \div 12/0.5 \div 24$ ($^\circ\text{C}/\text{sec}$)、 $v_2 = T_2/t_2 \div 0$ ($^\circ\text{C}/\text{sec}$)、 $v_3 = T_3/t_3 \div 5/0.5 \div 10$ ($^\circ\text{C}/\text{sec}$) $^\circ\text{C}$ である。



第4図 加工焼入における試験片の温度変化

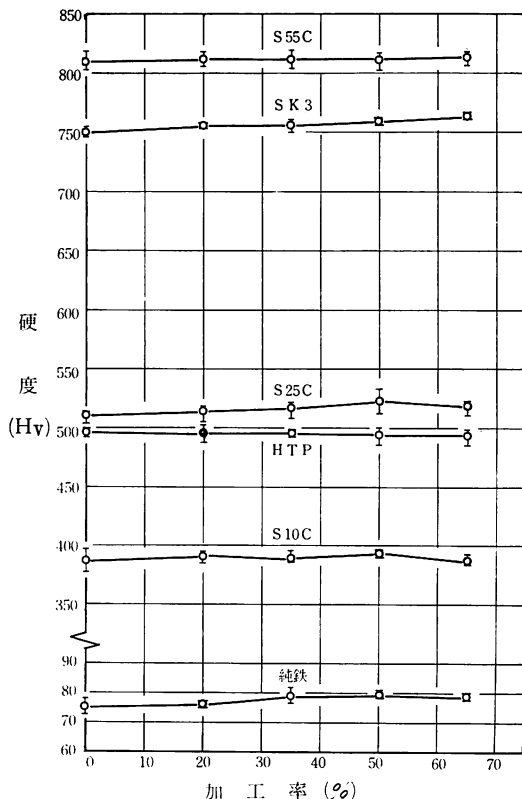
T_2 が約 0°C であるのは試験片と工具の接触が瞬間的であったことを示すものである。また T_3 が T_1 より小であるのは加工に伴う発熱によって一時的に冷

却が阻止されるためと考えられる。しかし加工に伴う発熱はあまり大きなものではなく、空冷により降下した温度が再び上昇する程のものではない。加工後ただちに水冷せずに空冷した場合には加工後約 0.7 秒後から再び温度の降下速度は大になった。この時の冷却速度を v_4 とすれば $v_4 \div 20$ ($^\circ\text{C}/\text{sec}$) であった。

加熱電源を切ってから加工後水冷開始までの時間は約 1 秒であり、その間の温度降下は約 17°C であって、保持温度と殆んど同一温度で加工および焼入が行なわれたことになる。

しかし仮に加熱停止後加工までの時間が 1 秒、加工後焼入までの時間が 1 秒要した場合にはその間の温度降下は約 37°C になる。従って一般に行なわれるような炉中加熱による加工焼入においては、試験片を加熱炉より取出してから焼入までの時間を極端に短縮することは困難であり、試験片が小さい場合には焼入までの時間内に相当の温度降下が生ずるのは避け難いと考えられる。

また加工法としてハンマー等による瞬間的加工法を用いた場合とロールによる圧延等の連続的加工法を用いた場合では、加工工具との接触時間等から考えて相当の温度差が生じることが予想される。特に試験片の寸法が小さい場合にはこの条件を無視できるものでは



第5図 加工率と加工焼入硬度の関係

ない。

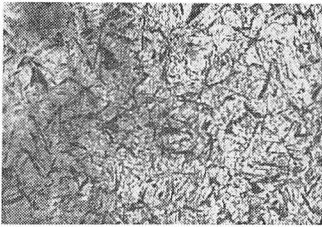
Ⅲ・2 加工焼入後の硬度について

1000℃で加工焼入したS55C, S25C, S10C, HPT, および純鉄の加工率と硬度の関係は第5図の如くである。

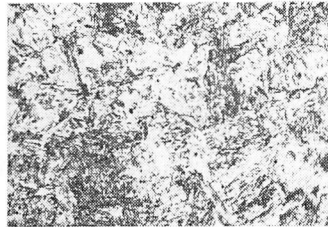
S55CおよびHPTにおいては加工率による硬度の上昇は認められなかった。S25Cにおいては加工率が増加するにつれて硬度もやや増加する傾向が認められるが、硬度増加は最大約13Hvであった。S10Cにおいては加工率による硬度増加の傾向は明確でない。S25C, S10Cにおいて硬度に多少バラつきが多いの

は焼入性の悪さに起因していると考えられる。これらの組織写真の一部を写真1に示す。いずれも完全マルテンサイト組織であるが、加工焼入したものはマルテンサイトが微細化していることが認められた。これは加工によるオーステナイト結晶粒の微細化に起因するものと考えられる。

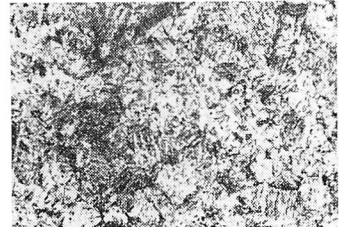
純鉄の場合には硬度増加は65%加工で約4Hvであり極く僅かであった。この差については結晶粒の微細化が関係していると考えられるが詳しくは後述する。純鉄の急冷後の組織は写真2に示すように結晶粒が微細化している。加熱後空冷した場合の硬度に比べると急冷した場合は約6Hv増加した。



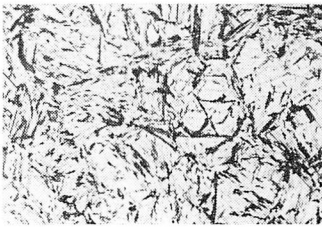
S55C 50%加工焼入



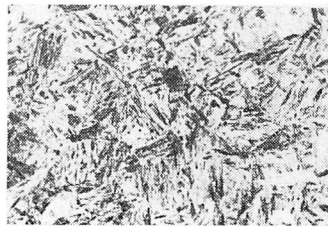
S25C 50%加工焼入



S10C 50%加工焼入



S55C 普通焼入



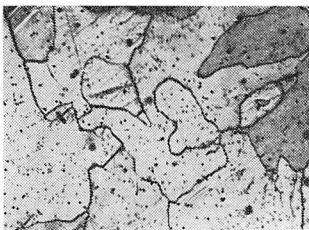
S25C 普通焼入



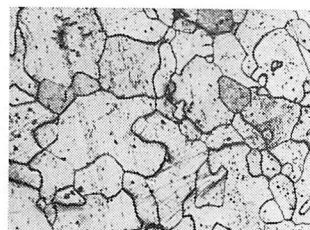
S10C 普通焼入

3%ニイタル腐食 ×400

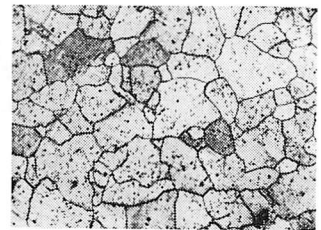
写真1 加工焼入後の組織



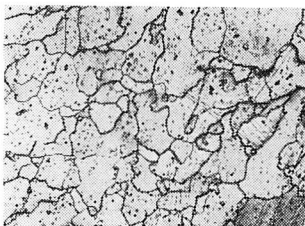
普通焼入



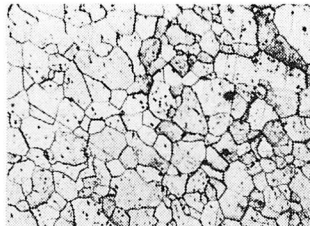
20%加工焼入



35%加工焼入



50%加工焼入



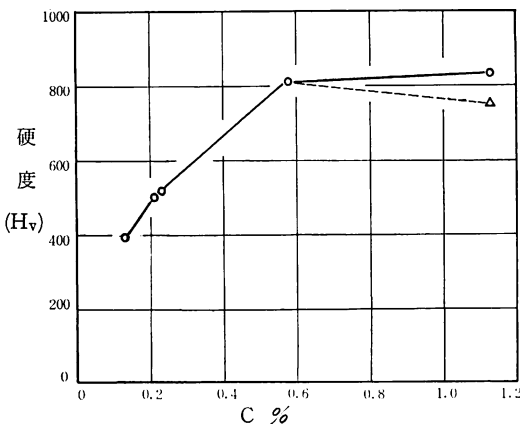
65%加工焼入

3%ニイタル腐食 ×100

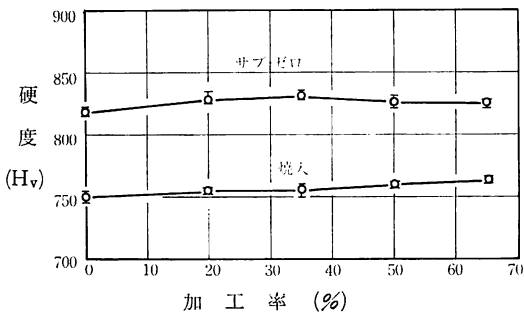
写真2 加工焼入した純鉄の組織

SK3においては最大硬度増加量は65%加工で約12 Hvでありやはり僅かであった。

各試料の焼入硬度とC%との関係は第6図に示した如くであって、一般に云われている最高焼入硬度と一致する。SK3においてはS55Cの硬度よりかなり低い値を示したがこれは残留オーステナイトが存在するためであろうと考え、水冷後液体窒素温度にサブゼロ処理した。その結果第7図に示すように約80 Hvの硬化を示した。しかしサブゼロ後の硬度も加工率とは無関係にほぼ一定であった。



第6図 加工焼入鋼のC%と最高焼入硬度の関係

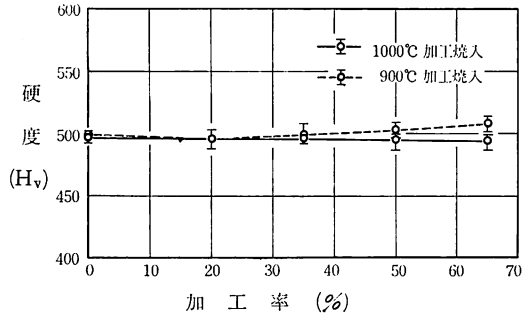


第7図 SK3の加工率と加工焼入硬度の関係

中村^{1)~4)} 塩谷^{5)~6)}らは加工焼入による硬度増加はかなり著しいものであると報告しているが、本実験の結果によると焼入後の硬度に及ぼすオースフォーミングの効果は全く無いとは云えないが極く僅かなものと考えられる。

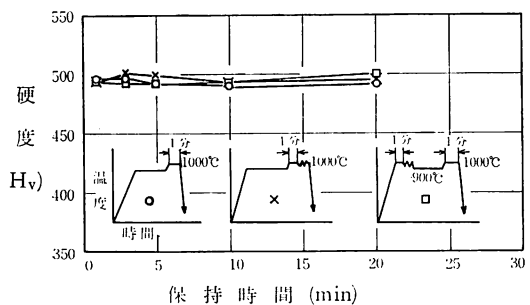
また焼入後の硬度は焼入温度によって著しい差があることが中村^{2)~4)}らにより報告されているが、HTPを900°Cで加工焼入した結果第8図に示すように1000°C加工焼入と比較して顕著な差は認められなかった。さらにS55Cについて、900°Cに加熱後普通焼入した場合、900°Cに加熱して50%加工後ただちに焼入した場合、および1000°Cに加熱後空冷し冷却過程におい

て900°Cになった時50%加工してただちに焼入した場合の三種類の処理法について硬度を比較した結果、各々808 Hv, 810 Hv, 809 Hvであり、1000°C加熱における加工焼入硬度810 Hvと差がなかった。



第8図 加工焼入温度と硬度の関係

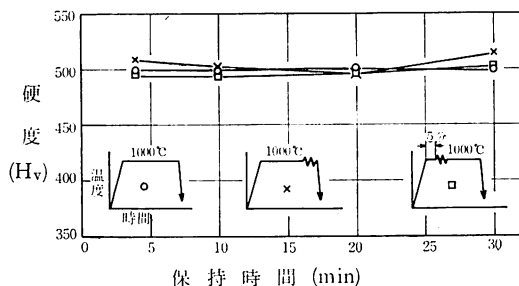
また加工焼入において加工後オーステナイト域の温度にある時間保持した後焼入した場合には、保持時間が長くなるにつれて硬度は低下し、S25Cにおいて加工後30分間保持した場合には普通焼入に比較しても約70 Hv低くなることが塩谷^{5)~6)}らにより報告されているが、HTPを加工後酸化が進行しないように試験片を黒鉛粉で保護して恒温保持した後焼入した結果、第9図に示すように加工後20分まで保持した後焼入しても加工後ただちに焼入した場合と比較して差は認められなかった。すなわち、完全焼入状態に至った場合には加工後の保持時間が長くとも焼入硬度の低下は生じなかった。加工後高温保持時間が長い場合に焼入後の硬度が低下するのは何らかの理由により不完全焼入になるためと考えられる。



第9図 恒温保持時間と加工焼入硬度の関係
(直接通電加熱)

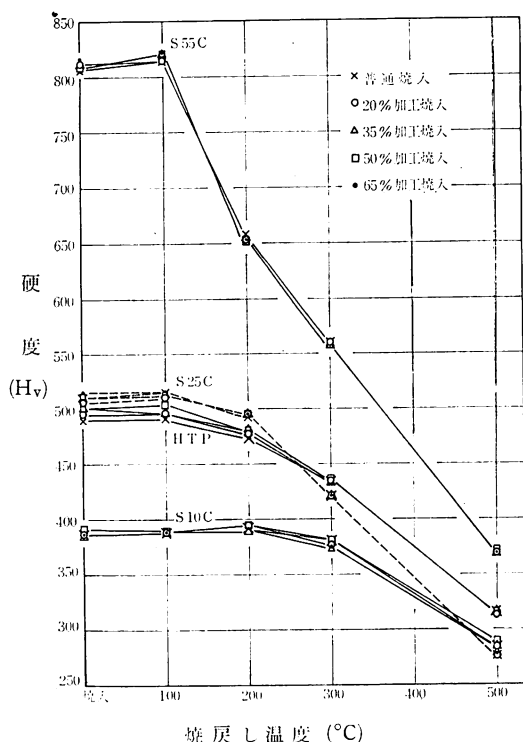
本実験において他と異なっている点は直接通電加熱法を用いた結果加熱が急速であること(約12°C/sec)、および加工までの保持時間が短いことである。この点について検討した結果第9図に示したように高温で20分まで保持した後普通焼入した場合も加工焼入した場合も焼入後の硬度には特に差はなかった。また

HTPを用いて同様の処理法を、加熱方法を変えてソルトバスによる加熱法により行なった結果も第10図に示す如く第9図と同様であり、保持時間による差も、処理法による差も殆んど認められず直接通電加熱法による場合と同様であった。



第10図 恒温保持時間と加工焼入硬度の関係
(ソルトバス加熱)

以上の結果から考えるに、加工焼入によって硬度が著しく増加すると云われているのは、如何なる理由によるのか明らかではないが加工することによって焼入性が向上するため、低加工率の不完全焼入から高加工率の完全焼入へと硬度増加が生じているのであって、実験条件を整え全て完全焼入状態に至らした場合には焼入後の硬度に及ぼす加工の影響、すなわちオ



第11図 焼戻し温度と硬度の関係

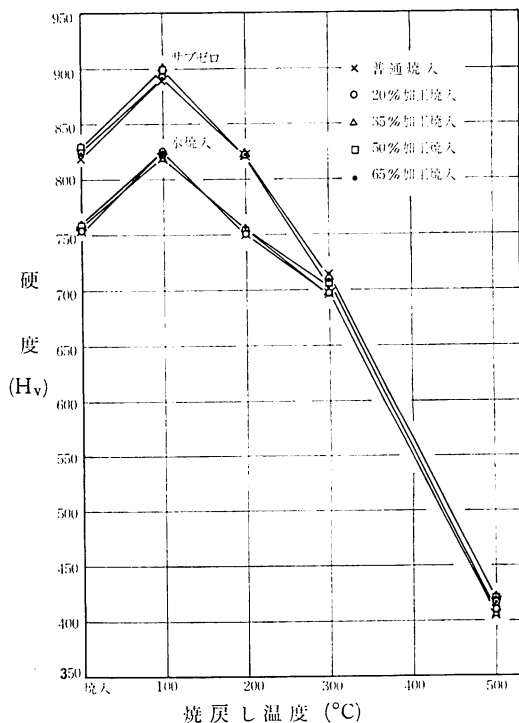
ースフォーミングの効果は皆無とは云えないが非常に僅かなものであると考えられる。

Ⅲ・3 焼戻後の硬度について

1000 °C 加工焼入後の S55C, S25S, S10C, および HTP を 100 °C 以上 500 °C 以下の各温度で焼戻した後の硬度の変化を第11図に示す。

中村,²⁾ 塩谷⁶⁾ らによると加工焼入した試料は焼戻し抵抗が大きく 600 °C で焼戻してもなお普通焼入に比べて確実に硬度が大であるとされている。しかし第11図によれば、いずれの試料においても加工率の相違による焼戻後の硬度差は認められず、焼戻温度の上昇につれて各加工率とも普通焼入と同様の硬度低下を示した。また焼入後の硬さが多少バラついている場合でも 300 °C, 500 °C と焼戻温度が高くなるにつれてむしろ硬度が揃ってくる傾向が認められた。

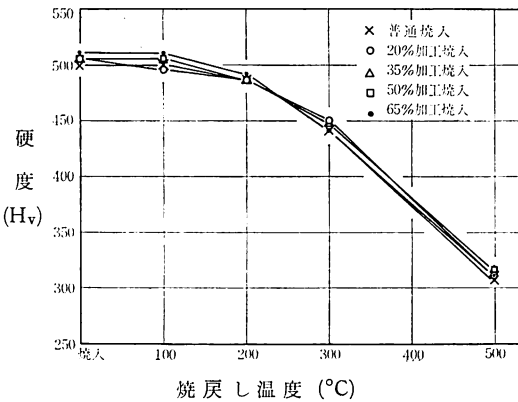
第12図に 1000 °C 加工焼入後の SK3, およびサブゼロ処理後の SK3 を同様に焼戻した結果を示す。この場合にも焼戻後の硬度は加工率とは関係なく、温度上昇につれて一様に低下した。サブゼロした場合は焼戻後の硬度も水冷のみの場合に比べて大であるが、焼戻温度が高くなるにつれて両者の差は減少した。



第12図 SK3の焼戻し温度と硬度の関係

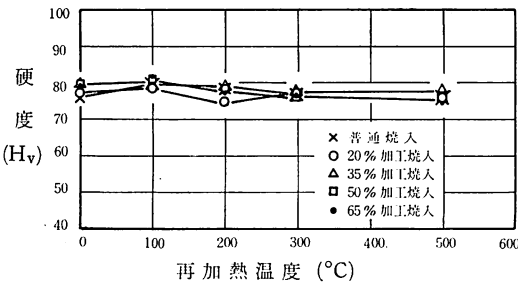
HTP を 900 °C で加工焼入した場合の焼戻後の硬度も第13図に示す如く、1000 °C 加工焼入した場合の焼戻しと全く同様の結果であり、焼入温度の相違による

焼戻後の硬度差も認められなかった。



第13図 900 °C 加工焼入した HTP の焼戻し
温度と硬度の関係

加工急冷後の純鉄を同様に再加熱した後の硬度は第14図に示すように、再加熱温度が高くなっても殆んど硬度の低下は認められず、加熱後空冷した場合の硬度よりは依然として大であった。また結晶粒の大きさは各加工率とも急冷した後と殆んど差がなかった。加工率の相違による再加熱後の硬度の相違はこの場合にも認められなかった。

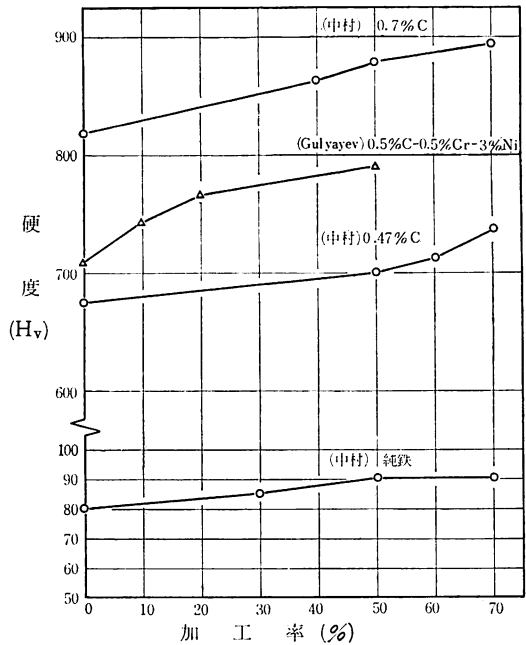


第14図 純鉄の再加熱温度と硬度の関係

Ⅳ 考 察

加工焼入における加工率と硬度の関係について、他の実験者のデーターを第15図に示す。^{1) 2) 4) 7)} いずれの場合も60%程度の加工で50~80 Hvの硬化が生じている。この場合、焼入性が良く容易に完全焼入となり得る鋼種が用いられているので、硬化因子の中での焼入性向上因子の占める割合は小さく、他の因子の存在も併せて考慮する必要が生じてくると思われる。

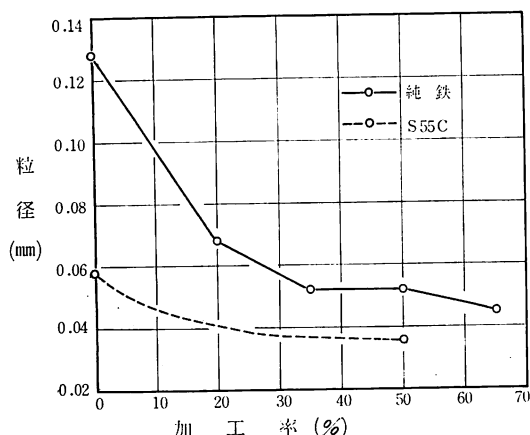
これらの報告では、このような硬度増加の理由として、焼入性の増加によるものと同時に、加工に伴って導入された格子欠陥がマルテンサイト中に継承された結果、一種のオースフォーミングの効果が生じるためであると説明している。そして、加工温度が低いほ



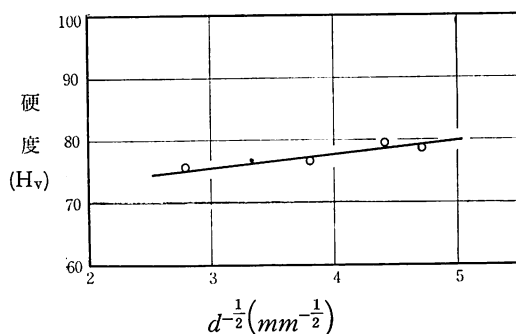
第15図 他の実験者による加工率と加工焼入
硬度の関係

ど、加工してから焼入までの時間が短いほど、加工された安定オーステナイトの回復再結晶率が低いので、加工の影響が残存しやすく、硬度増加が著しいと述べている。また、加工焼入した鋼の焼戻し硬度は一般に普通焼入よりも高く、良好な耐焼戻し性を示すと報告しており、²⁾ その原因として同じく、加工によるオースフォーミングの効果を挙げている。しかしながら、本実験の結果では、完全焼入状態である限りは加工率に伴う硬度の増加は殆んど認められず、いわゆるオースフォーミング効果は極めて僅かなものであった。さらに、加工焼入温度を変え、加工後焼入までの時間を変えてみても硬度は殆んど変わらず、これは焼戻したものについても同様であった。

このような実験結果の相違が、如何なる理由によるものかは不明であるが、準安定オーステナイトの加工による本来のオースフォーミングにおける硬化量が70~150 Hv程度であることを考慮するならば、高温の安定オーステナイトに対する加工の影響が、いわゆるオースフォーミング効果として50~80 Hvの硬化をもたらすことは考え難い。加工によってオーステナイト粒が微細化すれば、マルテンサイトも微細になり、Petch-Hall 効果によって硬度が上昇するという考え方もあり、⁸⁾ これは R. A. Grange,⁹⁾ V. F. Zackey¹⁰⁾ 等の説に基づいたものである。しかし Petch-Hall の関係は、結晶粒界への転位の pile-up による隣接粒内



第16図 加工率と結晶粒径の関係



第17図 加工焼入した純鉄の結晶粒径と硬度の関係

への応力集中を考慮して成り立っているものであって、粒内に形成された slip band によって結晶粒のすべり変形が進行するような条件を前提としているものである。したがって、これによって完全マルテンサイトの強度を論ずるのは、変形様式の相違からして疑問があると思われる。本実験では写真1に示すように、加工焼入によって、明らかにマルテンサイトは微細化している。しかし硬度増加は殆んど認められず、この限りでは、マルテンサイトの微細化は硬度増加には寄与していないことになる。強度特性のうち、硬度は比較的 Petch-Hall 効果の影響を受け難いものではあるが、それを考慮に入れても、このような実験結果を説明しうるものではないと考えられる。第16図は S55C および純鉄における加工率と結晶粒径の関係を示すものであるが、どちらも、加工による結晶粒微細化が生じている。ここで、純鉄について Petch-Hall の関係を適用してみると、第17図のように、弱いながらも直線関係が認められる。この場合、わずかながら加工硬化の影響が含まれていることを考慮しなければならないが、いずれにしても、この程度のものが、完全マル

テンサイト組織の硬度に大きな影響を与えるとは思われない。これらのことは、焼戻し後の硬度に関しても同様である。たとえば、加工焼入した純鉄において、加工の影響が歪硬化の形で残留しているならば、室温以上の再加熱によって歪時効が生じ、ある程度の硬度増加の生じることが考えられる。マルテンサイトの焼戻しにおいても、ほぼ同様の硬化が予想される。しかし、本実験においてはそのような硬化は認められなかった。

これらの結果からして、加工焼入におけるオースフォージング効果は極めて僅かなものであり、従来の報告にみられる著しい硬度増加は、加工率の増加に伴う焼入性の向上によって、不完全焼入成分が減少した結果として生じたものであると考えられる。したがって、このように、不完全焼入組織の存在する状態において、硬化因子としてオースフォージングの因子を取りあげるのは適当ではない。加工焼入における焼入性増加の真の原因が不明である現段階においては、焼入性の因子とオースフォージングの因子とを同一レベルで論じることが、問題を不明確にする恐れがある。すなわち、この両因子は一応分離した形で取扱うことが妥当であり、この意味から、完全焼入組織と不完全焼入組織の硬化因子は区別して考察することが必要であると考えられる。

総 括

加工焼入した S55C, S10C, HTP, および純鉄について、加工率と硬度の関係を調べた結果を要約すると次のようである。

1. 加工を加えることにより試験片の温度が降下することは避けられない。試験片の寸法が小さい場合には特に注意を要する。
2. 完全焼入状態に至らしめた場合には、硬度は加工率とは無関係にほぼ一定であった。すなわち、加工焼入におけるオースフォージングの効果は極く僅かである。
3. 完全焼入状態に至らしめた場合には、加工後直ちに焼入した場合も、加工後ある時間高温保持した後焼入した場合も硬度に差はなかった。
4. 加工焼入した鋼の焼戻し軟化曲線は、加工率とは無関係にほぼ同様の傾向を示した。

本実験を行なうにあたって、実験装置の製作、試験片の加工等について協力いただいた機械工学科実習工場の各位、ならびに実験の一部に協力された、日本建鉄㈱佐々木勇行、国鉄道支社鈴木光雄の両氏に深く感謝する次第である。また、試料の分析および溶解等に

ついてお世話になった室蘭工業大学金森教授，ならび
に特日本製鋼所室蘭製作所研究所の各位に厚く御礼申
し上げる次第である

文 献

- 1) 中村：日本金属学会誌，30 (1966) 151
- 2) 中村，浅村，山中：日本金属学会誌，32 (1968) 28
- 3) 中村，浅村，山中：日本金属学会誌，32 (1968) 1047
- 4) 中村，浅村，山中：日本金属学会誌，32 (1968) 1052
- 5) 塩谷，山田，樽谷：日本金属学会誌，31 (1967) 126
- 6) 塩谷，山田，稲田：日本金属学会誌，31 (1967) 347
- 7) A. P. Gulyaev : phys. Met. Metallog., 18 (1964), 78
- 8) 中村，浅村，山中：日本金属学会誌，32 (1968) 1043
- 9) R. A. Grange : Trans, ASM, 59 (1966), 26.
- 10) V. F. Zackey, et al : Strengthening Mechanisms in Solid, Cleveland, ASM, (1962), 179.

(昭和46年1月9日受理)

