常温以上で加工した軟鋼の低温焼鈍の影響*

桜井 忠一** 川崎 正** 北 幸 純**

The Effect of Low-Temperature Annealing on the Mild Steel Plastically Deformed at Elevated Temperatures

Tadakazu SAKURAI, Tadashi KAWASAKI and Yukizumi KITA.

The effect of working temperature and that of subsequent low-temperature annealing on the hardness and the magnetic properties have been investigated for low carbon mild steel and pure copper.

Specimens were deformed at temperatures between 75°C and 700°C, and then their hardness and magnetic properties were measured at room temperature. The higher the working temperature on pure copper the less its hardness, while the hardness of mild steel increases at first, reaching maximum at about 250°C and then decreases in accordance with increasing working temperatures. It is because of diffusion of carbon and nitrogen atoms in α -Fe during deformation.

Though the mild steel is hardened by annealing at low temperature after cold working, it is still more hardened through deformation at elevated temperatures.

When specimens are annealed for 30 min. at temperatures at 100°C to 700°C after elevated working temperature, the recovering temperature of mild steel and that of copper slightly increase according to working temperatures, and the hardening phenomena generally observed in annealing cold worked mild steel, were not seen when the working temperature was above 250°C.

1. 緒 言

冷間加工は、普通常温で行われ、加工後適当な低温焼鈍によつて材質が改善されることが多く、常温加工した鋼の低温焼鈍については、すでに、多くの研究がある。しかし、常温以上の温度で加工したものに対する加工後の焼鈍に関しては、あまり実験が行われていないようである。ここでは0.06% Cの極軟鋼を100~700°Cの温度で加工して、空冷したものを100~800°Cで30分焼鈍、炉冷した場合の硬さと磁性の変化を調べた結果を報告する。

本研究の目的は

(a) 加工温度が材質に及ぼす影響と、(b) 常温以上で加工した鋼の加工後の加熱による材質の変化とを調べることである。この中(a)については、材料は熱と機械的応力とを同時に受けるから、加工の影響のみならず組織上の変化がその上に重疊し、いわゆる加工硬化とは異なつた現象が起こるはずで、加工温度と加工度とを適当に選ぶことによつて材質の改善に有

効であると思われる。また、(b)は常温以上で加工した鋼の材質の温度に対する安定性、並びに軟化回復過程を調べることができる。

2. 実験方法

実験に用いた試料は0.06% C, 0.31% Si, 0.46% Mn, 0.016% P, 0.006% Sの極軟鋼と純度99.94%の純銅である。極軟鋼は所定の寸法に旋削してから、880°C 1時間、試料表面の脱炭を防ぐために、鑄鉄切削粉につめ込んで焼鈍を行い炉冷した。すでに述べたように、軟鋼は高温で加工すれば、加工硬化と同時に、組織上の変化が起こるはずであるから、実験結果を比較検討するために、加工中に組織上の変化の起こらない材料として純銅を選んだ。銅の試料はFig. 1に示した寸法に仕上げた後、350°Cで30分間焼鈍、炉冷した。

焼鈍した試料を小型の管状炉に挿入し、Fig. 2に示すようにアムスラー万能試験機に取り付け、試料を加熱し所定の温度に達してから10分保持した後、その温度で極軟鋼試料は約2~15%、純銅試料は約0.3~50%の引張加工し、加工が終れば、直ちに、試料を取りはずして空冷した。温度はFig. 2に示したように上下2箇のアルメルクロメル熱電対を試料の表面に接触せ

* 原稿受付 昭和30年12月12日 材料試験協会第4期総会講演会(昭和30.5.19)にて講演

** 正員 姫路工業大学

Fig. 1. Size of the specimen.

Fig. 2.

しめて測定し、上下2箇所の温度差は最大約4°Cに止めることができた。加熱温度が高い場合には、加工中に試料の表面が酸化するが、酸化皮膜はペーパーで軽く磨くと取れる程度であつたので、酸化および脱炭の影響はほとんど考慮する必要はないと思われる。

加工後の低温焼鈍は100°Cのときは沸騰水で、他は管状炉で加熱した。常温加工後の低温焼鈍は、加熱時間が10分～3時間の範囲で、特にいちじるしい時間の影響がみられなかつたので、本実験では加熱時間を30分と定め、その後、炉冷した。

加工および焼鈍後の時効の影響を考慮し、加工および焼鈍が終つてから1時間後に硬さと磁性の測定を行うことにした。硬さはロックウェル硬さ、磁気測定は弾動検流計法によつた。

銅の加工温度は常温、70°C、150°C、200°C、350°Cおよび450°Cとして各温度で0.3～50%の引張加工を行い、硬さの測定はロックウェル“F”スケールを採用した。加工後の焼鈍は極軟鋼と同様に行つた。

3. 実験結果

1. 加工温度の影響 極軟鋼に対する加工温度と

Fig. 3. Effect of working temperature on the hardness and magnetic properties of soft steel.

硬さおよび磁性との関係を示すと Fig. 3 のとおりで、図には加工度約3%および9%の場合を示してあるが、加工度の如何にかかわらず同じ傾向が得られた。図からわかるように、同じ加工度でも温度によつて硬化の程度は相当変化し、約250°Cすなわち青熱脆性域で加工した場合に硬化が最もいちじるしい。加工温度がこの温度よりも高くなると、硬さは次第に低くなるが、450°Cすなわち鉄の再結晶温度以上で加工した場合でも、相当の硬化が起こる。硬さの変化に対応して導磁率の変化が起こり、硬さが最高の場合に導磁率は極小となる。強磁性材料の磁気感応度は弾性的な応力によつて敏感に変化するもので、磁気感応度を最大ならしめる弾性引張応力を σ_e とすると、これは試料の残留応力に対応するもので、 σ_e と加工温度との関係もだいたい硬さの場合と同様である。

一般に、金属材料の変形抵抗は変態の起こらない範囲では温度が高いほど低いのが普通で、また、 α 真鍮を高温で加工した実験の結果によれば、同じ加工度に対して加工温度が高いと硬さは低下し、Fig. 3 のように、ある加工温度で硬さが極大になるような現象は現われない。したがつて、軟鋼における250°C附近での硬さの上昇は内部組織の変化によると考えられる。このことを確かめるために純銅について実験を行つた。純金属は単相であり、温度によつて組織上の変化は起こらないから、各温度における加工だけの影響を調べ

* 常温以上で加工した場合には、加熱時間の影響が相当複雑であることがわかつたので、それについては続報で述べる。

Fig. 4. Work-hardening curves of pure copper at various temperatures.

ることができる。

常温から 450°C の各温度で純銅に引張加工を加えた場合、硬さと加工度との関係を Fig. 4 に示した。加工硬化曲線の傾斜は、加工温度が高いほどゆるやかになっている。同じ加工度に対して、硬さ

Fig. 5. Effect of working temperature on the hardness of pure copper.

と加工温度との関係を調べると、極軟鋼の Fig. 3 に対応して Fig. 5 が得られた。すなわち、極軟鋼の場合のように硬さの極大は現われなくて、加工温度が高くなるにつれて硬さは次第に低くなる。

この材料を 350°C で焼鈍したときの硬さは、ロックウェル "F" 10 であったから、銅の再結晶温度よりも、相当高い温度、すなわち、450°C で加工しても相当の加工硬化が起こることがわかる。

以上の実験結果から、純金属では、常温加工材の再結晶温度よりも低い温度で加工すれば、加工温度の影響はあまりいじりくしないことから、極軟鋼が 250°C 附近の加工で、いじりくして硬さが高くなるのは、主に組織上の変化によるものである。

2. 常温以上で加工した後の低温焼鈍の影響 極軟鋼を 100°C ~ 700°C の各温度で約 3% から 9% の引張加工を与えた後、これらをさらに 100°C ~ 800°C でそれぞれ 30 分焼鈍して炉冷し、常温で硬さと磁性とを測定した。結果の代表的なものを Figs. 6 ~ 8 に示した。Fig. 6 は 100°C で加工した試料の焼鈍による回復過程を示すものであるが、常温から約 200°C の範囲で加工したものに対しては、この図と全く同じような結果が得られた。すなわち、100°C 加工によつて硬さは増すが (Fig. 3)、その後 100°C 30 分の焼鈍でさらに増加し、200°C 焼鈍でわずか軟かくなり、250°C ~ 350°C 焼鈍で

再び硬化が起こつて極大となり、その後は 600°C まで徐々に低下し、700°C で急に軟かくなつて、800°C で焼鈍した最初の値まで回復する。

上記のように、硬さが 100°C および 250°C ~ 350°C の焼鈍で増加するにもかかわらず、導磁率は加工後約 400°C 焼鈍までは徐々に回復し、その後、急激に増加して 700°C で極大となり、800°C 焼鈍で最初の値に戻っている。 σ_c もだいたい導磁率と相対応じて変化し、700°C で極小となり、800°C 焼鈍によつて最初の値に戻っている。加工度の

如何にかかわらず、加工後 700°C で焼鈍すると導磁率は極大となり、 σ_c が極小となることから、この状態では、結晶粒内に欠陥とか残留格子歪が最も少ないと考えられる。また、800°C 焼鈍で導磁率が低下するのは、 A_1 変態による内部応力の発生、並びに結晶粒度の変化によるものと思われる。

Fig. 7 は 250°C で 2.67% ~ 9.66% の加工を与え、その後、各温度で 30 分焼鈍した場合の結果で、250°C ~ 500°C の範囲で加工したものでは、この図とほとんど同じ傾向の結果が得られた。250°C 加工の場合には、100°C 焼鈍で硬さは低下するが、その後 350°C 前後で再び硬化が起こつて硬度は極大となり、その後は

Fig. 6. Changes of the magnetic properties and hardness caused by annealing at various temperatures after cold worked at 100°C.

Fig. 7. The same as Fig. 6 except the specimens were cold worked at 250°C.

Fig. 8. The same as Fig. 6 except the specimens were hot worked at 700°C.

250°C以下で加工した場合とほとんど変りない。しかし、加工温度がそれ以上の場合には、350°C前後における硬化、すなわち、加工後の焼鈍による硬化現象は全く起こらないことがわかった。導磁率の回復過程をみると、250°C以下で加工した場合には、加工後100°~400°Cの焼鈍でわずかではあるが、導磁率は増加するが、250°C加工のものでは約400°Cまでほとんど変化しないで500°Cから急に増加し、700°Cで極大となり、800°Cで最初の値にもどる。Fig. 8は700°C加工の場合で、加工後約600°C以下の焼鈍では硬さおよび磁性はほとんど変化せず、700°C焼鈍で初めて、硬度の低下と導磁率の増加が起こった。このように、加工温度によって、焼鈍による回復過程はその傾向を異に

Fig. 9. Recovering temperatures at which remarkable recovery begins, are plotted as function of working temperatures.

するが、いま、加工後の焼鈍によって、硬さが急に低下し始める温度、および導磁率が急に増加し始める温度をそれぞれ硬さおよび磁性の“回復温度”とすると、この温度と加工温度との関係はFig. 9のようになる。加工温度が高いほど磁性の回復温度はほぼ直線的に高くなり、硬さの回復温度は、加工温度が約250°C以下では、だいたい一定と考えられ、250°C以上では加工温度が高いほど回復温度も高くなる。そして一般に硬さは磁性よりも遅れて回復し、また、本実験における加工度の範囲では、硬さ、および磁性の回復温度は加工度の如何にかかわらず一定である。

常温から450°Cの範囲で、約50%の引張加工を与えた純銅を加工後、450°Cまでの各温度で30分焼鈍した場合の硬さの変化を調べるとFig. 10が得られた。焼鈍時間を30分とした場合、銅合金にみられる、いわゆる異常硬化現象は現われないで、ある一定の温度までは硬度の変化が起こらず、その温度を越えると、きわめていちじるしい硬さの低下が起こった。軟鋼の場合

Fig. 10. Recovery of pure copper.

Fig. 11. Relation between recovering temperature and the working temperature.

と同様に、硬さの低下が始まる温度は加工温度が高いほど高くなっており、ことに、450°C加工のものでは回復が非常に遅れている。硬さの回復温度と加工温度との関係はFig.9の点線で示したように回復温度は極軟鋼と同様に、加工温度の上昇とともに高くなる。いま、硬度の回復温度を T_R 、加工温度を T_W 、また、常温加工材の再結晶温度を θ で表わすことにし、極軟鋼および純銅の θ をそれぞれ450°Cおよび200°Cとして、 T_R/θ と T_W/θ の関係を調べてみるとFig.11が得られた。図のように加工温度による回復温度の変化は、材料の如何にかかわらず、一つの曲線にて表わされ、加工温度が高くなるにつれて回復温度は高くなる。

この実験結果から、高温で加工すると再結晶温度が高くなるという結論を下すのは早計であるが、加工温度が高いほど、加工硬化の回復が遅れることは事実であり、多くの金属に対して共通の性質と考えられる。

4. 結果に対する考察

軟鋼を常温加工後、低温で焼鈍すれば硬度が加工直後よりも高くなり、250°Cで極大になることは、すでに多くの研究によつて確かめられている^{11, 13) ~ 16)}。常温以上のある温度 $t^\circ\text{C}$ で加工した場合の硬さが、常温で加工した後、その温度 $t^\circ\text{C}$ で焼鈍した場合の硬さにほぼ等しければ¹⁷⁾、加工中に上記の歪時効による硬化が起こると考えることもできるが、両者の硬さを比較すると、常に前者の方が相当高いので、常温以上の温度で加工すると、いわゆる加工硬化と低温焼鈍による時効硬化とが単に重疊して現われるばかりでなく、高い機械的な応力と熱とが同時に働くために、 αFe 中に過飽和に固溶している炭素、あるいは窒素の拡散が異常に起こり、炭化物および窒化物の析出並びにatmosphereの形成が促進されるために、このように硬い組織が得られるものと思われる。

いま、ある温度 $t^\circ\text{C}$ で一定の伸び ϵ を与えた場合の硬さと、常温で ϵ の伸びを与えてから $t^\circ\text{C}$ で30分焼鈍した場合の硬さとの差を ΔH_t とすれば、この ΔH_t は常に正となり、 ϵ が約8%の場合 ΔH_t と温度との関係はFig.12の白円で示したとおりである。また、約8%

Fig. 12. Stress required to deform the specimens by about 8% and ΔH_t plotted as the function of working temperatures.

の加工を与えるに必要な応力と加工温度との関係はFig.12の黒円のようになり、この図の二つの曲線はいずれも250°C、すなわち、静的試験における青熱脆性の温度で極大となり、高い応力が働いているほど、 ΔH_t は大きくなることがわかる。

次に、純銅を450°Cで加工した場合、あるいは極軟鋼を700°Cのような高温で加工した場合には、焼鈍による回復が非常に遅れるが、これは加工中に自己焼鈍および一部再結晶が起こつて、残留格子歪が小さくなるためであると思われる。

5. 総括および結言

常温以上の温度で加工した場合、並びにその後の焼鈍による硬さと磁性の変化について得られた結果を述べたが、主なるものを簡単にまとめると次のようである。

(1) 加熱によつて組織上の変化が起こらない純銅のようなものでは、加工温度が高いほど、加工硬化量は減少するが、加熱によつて組織上の変化の起こる極軟鋼では250°C加工の場合に、硬化が最もいちじるしくなる。

(2) 常温加工後、低温焼鈍した場合よりも、その温度で加工した場合の方が硬さは高くなる。これは熱と機械的応力とが同時に働くので、過飽和の炭素および窒素が異常に析出し、また、atmosphereの形成も促進されるためである。

(3) 常温以上、ことに、250°C以上で加工して得られた高い硬さは、その後約500°C以下の温度に加熱してもあまり軟化しない。

(4) 加工温度が高いほど、回復軟化の始まる温度が高くなる。

(5) 加工温度の如何にかかわらず、加工後700°C焼鈍によつて導磁率がきわめて高くなる。

以上の結果より軟鋼を約250°Cで加工することは硬化、したがって、静的強度の向上に対してかなり有効

であり、また、加工温度の如何にかかわらず、加工後約700°Cで焼鈍することは、電気機械の磁気回路を形成する機械部品の磁性の改善に対して、有効であることがわかった。

終始御指導を賜わつた大阪大学教授篠田軍治先生に感謝の意を表します。

注一

- 1) 篠田, 日本金属学会分会報告 IX, p. 102 (1952)
- 2) 川崎, 同上, p. 115, 130, 164
- 3) 山田, 同上, p. 182
- 4) 今井, 石崎, 日本金属学会誌, 第18巻, p. 524 (1954)
- 5) 篠田, 川崎, 同上, B-14 No. 8 (1950), 15, No. 6 (1952)

- 6) 三島, 森川, 山内, 同上, 第18巻, p. 543 (1954)
- 7) 篠田, 川崎, 同上, 第18巻, p. 305 (1954)
- 8) 作井, 佐々木, 佐藤, 日本金属学会講演概要, 90 (1955)
- 9) 上井, 鉄と鋼, 第41巻, p. 593 (1955)
- 10) 篠田, 鈴木, 日本金属学会誌, B-14, No. 10 (1950)
- 11) 三島, 同上, 第19巻, p. 241 (1955)
- 12) 京谷, 同上, 第19巻, p. 255 (1955)
- 13) F.R.N. Nabarro. Rep. Strength of Solid, 38 (1948)
- 14) 今井, 石崎, 日本金属学会誌, 第18巻, p. 524 (1954)
- 15) 西山, 山本, 同上, 第15巻, p. 7 (1951)
- 16) 今井, 石崎, 同上, 第16巻, p. 4 (1952)
- 17) 中村, 材料試験, 第3巻, p. 250 (1954)
- 18) A.H. Cottrell Rep. Strength of Solid, 30 (1948)
- 19) Seitz, Physics of Metals, McGraw Hill Co. (1943)

薄板の剪断加工における剪断速度の影響*

下村 英太郎** 中 部 主 信**

How Affects Shearing Speed on Shearing of the Thin Plate.

Eitaro SHIMOMURA, Kazunobu NAKABE.

In mechanical industry, the most important means to decrease production costs are to save materials and to cut off working hours, as in the case of other manufacturing industries.

On these points, it is one of the most powerful methods to adopt the thin plate working by so-called presses.

We, firstly, computed the shearing of the thin plate, and we found the factors affected by shearing speed.

1. ま え が き

一般に、製造工業において、生産原価の低下をはかろうとする場合には、材料の節約と工数の低下が主な目標となつてくる。機械工業においても、当然、同様な目標をもつて、原価の低下をはからねばならない。さて、これに対して、最も有効な方法の一つは薄板の剪断、あるいは、絞り加工である。われわれは、この目標に対して、最初に薄板の剪断加工に対して剪断速度がどのような影響を与えるかを調べ、それらの分野の参考資料とすることにした。

2. 実験装置および方法

剪断実験の装置はFig.1に示すような平行な2稜の切刃を持つパンチとダイを、アムスラー型材料試験機(容量30 ton)に装置して、薄板の剪断速度と剪断荷重、ならびに、剪断速度と製品の切口の形状の関係を測定した。実験に使用したパンチとダイは、工具鋼を用い、切刃には肌焼を施した。硬さはショアの80~82で

ある。また、アムスラー型材料試験機に取付けたときのパンチとダイの遊

隙は、平均0.07mm

とした。これは、本実験に使用した薄板の厚

さが、1~1.5mmであるから、その厚さの7

%をねらつたわけである。薄板の支持方法

は、スプリングを利用し、両端固定(2重×4)、

片方固定(2重×2)、両

端自由の3種類を採用

した。そして、これら

の支持方法の影響が剪断製品の切口形状に、如何なる変化をあたえるかも測定した。試験片の支持用に用いたスプリングの寸法、ならびに荷重と撓みとの関係はFig.2のとおりである。ただし、このスプリングは実験第1の結果から、さしあたり不必要と考えられたので、実験第2以下には当分使用しないことにした。

Fig. 1. Punch and die.

* 原稿受付 昭和30年11月1日, 昭和27年10月18日関西工学会合講演会にて講演

** 近畿大学工学部