常溫塑性加工せる金属の焼鈍による変形 (第 1 報) 常溫引張加工せる低炭素鋼棒の焼鈍による長さの増減について*

關 口 春次郎** 稻 垣 道 夫**

Harujiro Sekiguchi and Michio Inagaki : Dimensional Changes due to Annealing of Plastically Cold-Worked Metals (1). On Length-Change due to Annealing of Plastically Elongated Low Carbon Steel Bar. The authors have investigated the effects of working-degree before annealing, annealing temperature and annealing time on length-change due to annealing after plastic elongation. The results were as follows: (1) If an elongated specimen is annealed at a low temperature, the length of specimen after the annealing increases. The percentage of increase rises with the working-degree. But, if the working-degree becomes so large that a remarkable local contraction occurs, the increase in length diminishes on the contrary. (2) The percentage of increase in length of elongated specimen due to low temperature annealing reaches the maximum at about 500°. (3) If a low carbon steel bar is annealed at higher temperature above the transformation point, the length tends to decrease regardless of working. (4) If an elongated specimen is annealed at about 500°, the length of specimen increases rapidly at first with the increase of annealing time, but the rate of increase shows a gentle slope after the lapse of 30 min~1 hr. In a highly-worked specimen, the time that is required to attain the gentle slope seems to be shorter. In the case of annealing at 600~700°, the length decreases with the increase of annealing time on the contrary.

(Received August 9, 1954)

I. 緒 言

従来塑性加工せる金属を焼鈍すると、比重 (體積) が變化し⁽¹⁾、長さの變化があるということ⁽²⁾は古くから認められている。しかし塑性加工による変形の方角とその後の焼鈍による変形の方角との関係を系統的に研究した例はないようである。著者らは 1946 年以來この問題を詳細に研究し、ようやくしてほぼ全ぼうを掴むことが出来たので、今後順を追って発表する次第である。まず本報では塑性引張加工せる低炭素鋼棒の焼鈍による長さの變化のみについて述べる。

II. 引張加工による変形

0.15 % C の低炭素鋼高温延材を旋削して直径 10 mm、標點距離 80 mm の引張試験片を作り、これを 900° に 1 hr 加熱爐冷した後、オルセン試験機で引張加工し、直径および長さが塑性変形した割合の比 μ を求めた。

$$\text{塑性変形率比 } \mu = \frac{\text{直径収縮率 } \Delta d/d}{\text{延伸率 } \Delta l/l} \dots\dots\dots (1)$$

そして得られた μ の値と加工度との関係は Fig. 1 の

白點分布のごとくである。延伸率 $\Delta l/l$ は比較測長機で測定し、直径収縮率 $\Delta d/d$ はマイクロメーターで測定した

Point O : 0.15 % C steel bar, gauge length 80mm, dia. 10 mm

Point ● : 0.26 % C steel bar, gauge length 50 mm, dia. 6mm

Fig. 1 Relation between plastic deformation ratio and plastic elongation.

これによ
ると兩變
形率の比
 μ の絶
對値は加
工度すな
わち延伸
率の増加
と共に小
となる傾
向にあ
る。すな

わち加工度が増すと延伸率の増加は直径収縮率の増加よりも大きくなる傾向にある。

直径 6 mm、標點距離 50 mm の 0.26 % C 低炭素鋼棒についても略々同様であり、Fig. 1 の黒點分布はその傾向を示している。

さて丸棒の體積が $V = \frac{\pi}{4} d^2 l$ であるものを變形させた場合、直径が $(d + \Delta d)$ に、長さが $(l + \Delta l)$ に、體積が $(V + \Delta V)$ になつたとすれば、次式 (2) が成立する。

$$\frac{\Delta V}{V} = (1 + 2\mu) \frac{\Delta l}{l} + (2\mu + \mu^2) \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 + \mu^2 \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^3 \dots\dots\dots (2)$$

そして、 $\Delta l/l$ および μ を正確に實測すれば (2) 式により $\Delta V/V$ を計算で求めることが出来る。實測の場合 $\Delta d/d$

** 名古屋大學工學部

* 1949 年 1 月本會東海支部講演會に發表

(1) 石垣、金属の研究, 3 (1926), No. 7 等。

(2) 松田、金属の研究, 2 (1925), 1179; M. Polanyi u. G. Sachs, Z. Metallk., 17 (1925), 227; 山口、研野、理研彙報, 8 (1929), 34; 9 (1930), 329; J. L. Rosenholz & D. T. Smith, J. Appl. Phys., 21 (1950), 396; 篠田、田中、鈴木、本誌, B-14 (1950), No. 10, 25 等。

および $\Delta l/l$ の値は試片直径の不揃一および加工による變形の不揃一などのために著しく精確を期することは困難で、Fig. 1 に見るごとく測定點が平均線の上に稍々著しくばらついている。そしてこの測定誤差は(2)式で求める $\Delta V/V$ の値に敏感に影響するので、 $\Delta d/d$ および $\Delta l/l$ の實測値に基づいて求めた $\Delta V/V$ の値はあまり精確ではない。しかし加工による體積變化の大凡の傾向はこの方法によつて求めることができる。

Fig. 1 の曲線から求めた體積變化の一例を Table 1 に
Table 1 Volume-change due to cold-extension (plastic elongation).

Elongation $\Delta l/l$ %	Plastic deformation ratio $\mu = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l}$	Volume-change $\Delta V/V$ %
8	-0.475	+0.01
10	-0.460	+0.13
13	-0.448	+0.22
15	-0.443	+0.24
18	-0.435	+0.22
20	-0.430	+0.23

示す。これによると高温で壓延した低炭素鋼棒を焼鈍した後引張加工して塑性變形させれば、體積はその加工によつて増加する傾向があることがわかる。

III. 引張加工後焼鈍による長さの變化

1. 焼鈍による長さの變化の均一性

供試材料は 0.15 % C (C 0.15, Mn 0.47, Si 0.21, P 0.033, S 0.014) 低炭素鋼棒で引張試片は直径 10 mm, 標點距離 80 mm である。この試片を豫め真空中で 900°, 1 hr 定温保持後爐中冷却を行つてから、5 t のオルセン試験機で引張加工した。加工後試片の摺みの部分を切斷して平行部の兩端をフ

Fig. 2 Relation between length-change due to annealing at 600° or 800° for 1 hr and previous elongation for 0.15 % C steel bar (dia 10 mm).

つた。そして各段階の中央にボンチ孔をあけて標點とした。かくして出來た試片を真空中で 600° に 1 hr 定温保

持後爐中冷却を行い、比較測長機を用い試片軸心より種々の距離にある標點につき焼鈍による長さの變化を測定した。次にこれらの試片を更に 800° に 1 hr 定温保持後爐中冷却を行い、再び長さの變化を測定した。その結果によれば長さの變化は場所によつて若干相違するようであるが、試片の表面と中との相違の一定傾向は見出されなかつた。従つて今後は大抵の場合、試片の表面の 2 個所について長さの變化を測定し、その平均値を以て試片の長さの變化とした。Fig. 2 にはかくして求めた焼鈍による長さの變化を、焼鈍前の引張加工度すなわち延伸率に對してプロットしてある。600°, 1 hr 焼鈍の場合、試片は加工の程度に

(a) Length-change in simple annealing. (Holding time of const. temp.: 10 min, cold-extension before annealing: 5.5 % elongation).

(b) Length-change at room temperature after annealing. (Holding time of const. temp.: 10 min).

(c) Length-change in repeated annealing. (Holding time of const. temp.: 10 min, Cold-extension before annealing: 7.1 % elongation.)

Fig. 3 Length-change with temperature for 0.26 % C steel bar. (dia. 6 mm).

拘らず、一般に焼鈍によつて伸びる。その長さの増加割合は加工の増加と共に大きくなり、加工の際の最大荷重部分すなわち延伸率 10~18% の間で極大となり、局部收縮を起したものは小さくなる。800°, 1 hr 焼鈍の場合に

は 600° の場合と逆に試片の長さは減少する。そして延伸率が著しく大きくなると長さの減少割合は小となる。

2. 焼鈍中の長さの変化と焼鈍前後の長さの変化

供試材料は 0.26 % C (C 0.26, Mn 0.56, Si 0.02, P 0.019, S 0.011) 圧延鋼棒である。試片の直径は 6 mm, 標距距離は 50 mm で全長が約 80 mm の丸棒である。まず豫備実験として豫め 850° および 950° にそれぞれ 1 hr 保持後爐冷せる試片を, 加工しないで再び種々の温度に 10 min 間保持後爐冷して長さの変化を調べた。その一例を Fig. 3(b) の曲線 (1) に示す。これで見ると, 加工しない試片でも約 700° 以上に加熱冷却すれば長さが減少する。しかしその温度以下で加熱冷却した場合には長さの変化は殆んどなかった。

次に引張加工せる試片の焼鈍中における長さの変化を示差熱膨脹計で調べた。標準試片としては豫め 950° に 1 hr 真空焼鈍せる同一材のものを用いた。従つてこれによつて加工の影響が直ちに読みとれるわけである。焼鈍前後の常温における長さの変化は示差熱膨脹計と比較測長機の両方で測定した。Fig. 3(a) は豫め 900°, 1 hr 真空焼鈍せる 8 個の試片を引張加工して平均 5.5 % の加工度を與え, 各試片を加熱してそれぞれ一定温度に 10 min 間保持後爐冷せる場合の全過程について示差熱膨脹を測定した結果を示す。すなわち焼鈍温度 125°, 227° の試片は長さの変化がほとんどないが, それ以上の温度で焼鈍したものは 250° あたりから伸び始め 550° あたりまでは焼鈍温度の上昇と共に伸びも増加する。そして一定温度に保持する時は時間と共に伸びは増加し, その温度から徐々に爐中冷却するときはそれが常温まであまり変化なく持ち來たされる。かくして求めた常温における熱膨脹計の読みを圖示すると, Fig. 3(b) の曲線 (2) となる。またこれらの各試片を取り出して比較測長機で長さの変化を測定すると曲線 (3) となる。これら曲線 (2) と (3) はかなりよく一致している。上述したところは多数の試片を用い単一の焼鈍を行つて得られた結果であるが, 次に 1 個の試片を繰返し焼鈍する場合どうなるかを調べて見る。引張加工度 7.1 % の試片を低い温度から高い温度の方へ數回加熱冷却を繰返して, 焼鈍中の全過程について示差熱膨脹を測定すると, Fig. 3(c) のようになる。すなわち 250° 附近から試片は伸び始め, 一定温度に保持すれば伸びが増加するが, その後冷却すれば途中あまり変化なく常温に持ち來たされ, それを更に加熱して高い温度にあげると再び伸び始める。このような経路は 500° 附近まで繰返されるが, それ以上の温度に加熱し一定温度に保持すれば収縮し始め, その後冷却すれば高温における長さの変化が略々そのまゝ常温に持ち來たされる。700° 以上の温度になれば既述の通り標準試片が収縮するので, 加工せる試片の長さの変化を示差膨脹で測定することが出来なくなる。Fig. 3(c) において焼鈍後常温に戻したときの長さの変化ならびに 700° 以上の焼鈍による長さの変化を比較測長機で測定して得た結果を圖示すると Fig. 3(b) の曲線 (4) となる。Fig. 3 を見ると単一焼鈍の場合 [曲線 (2) または (3)] と繰返し焼鈍の場合 [曲線 (4)] との長さの変化の傾向はほとんど類似している。

従つて爾後加工度の影響を調べる際には實驗を簡便にするため繰返し焼鈍を行つた。すなわち種々の加工度に引張加工した 9 個の試片について, 加熱し一定温度に 10 min 間保持後爐冷を行つた。そして各試片につき低温から高温まで繰返し行いその全行程の示差熱膨脹を測定した。焼鈍前後における長さの変化は示差熱膨脹計の読みで求め, また比較測長機によつて測定し兩者の平均によつて求めた。また 700° 以上の焼鈍温度では, 比較測長機による測定値のみから長さの変化を求めた。焼鈍中の示差熱膨脹曲線は Fig. 3(c) の曲線と傾向が略々一致した。それぞれの加工度について焼鈍前後における常温の長さの変化を一括して示すと Fig. 4 の通りになる。この圖から次のことがわか

Fig. 4 Effects of previous elongation and annealing temperature on length-change at room temperature after annealing. (Holding time of const. temp.: 10 min., Full annealing before extension: 950°, 1 hr).

Fig. 5 Relations among length-change, previous elongation and annealing temperature. (Holding time of constant temperature: 10 min).

る。すなわち低い焼鈍温度では加工度の増加と共に長さの変化曲線は全體が(+)の側にあがる。すなわち低い焼鈍温度では加工度の増加と共に焼鈍に

る。すなわち何れの加工度についても引張加工せる 0.26 % C 鋼棒を焼鈍するときは, 低い焼鈍温度では伸び, 高い温度では縮む。引張加工による局部収縮開始までは加工

よる長さの増加が大きくなるが、著しく局部収縮を起す加工度になると却つて長さの増加が小さくなる。Fig. 5 はこれらの曲線から長さの變化、引張加工度および焼鈍温度 (定温保持時間 10 min) の關係を求めて圖示した立體圖である。たとえば焼鈍温度 500° の場合、ハッチングの高さはそれぞれの延伸率に対する長さの變化を示している。 100° 、 700° および 900° 焼鈍の場合についてもハッチングを施し長さの變化と延伸率との關係を明らかにしてある。ハッチングを施してない他の焼鈍温度に対する延伸率-長さの變化断面についても同様に考えれば、延伸率と長さの變化との關係が如何になつていゝかがわかる。長さの變化が頂度零になる場合の延伸率と焼鈍温度との關係は太い鎖線で示してある。Fig. 5 によれば加工度が增加すると長さの變化が零になる焼鈍温度は次第に上昇し、著しく局部収縮を起す加工度になると反對に降下する。

3. 焼鈍時間の影響

焼鈍前の加工度と焼鈍温度とが焼鈍による長さの變化に

Fig. 6 Length-change with increase of annealing-time at constant temperatures for 0.26 % C steel bar (dia. 6 mm).

およぼす影響については、すでに (1), (2) において述べた。そこでここでは焼鈍時間の影響について述べることにする。上記のごとく、示差熱膨脹計の昇温中の読みは略々そのまゝ常温に持ち來たされるので、一定温度に保持中の示差熱膨脹計の読みを時間の経過に従つて採れば、焼鈍時間が長さの變化におよぼす影響を知ることが出来る。かようにして測定した二三の例を Fig. 6 に示す。これは加熱し

て一定温度となつた瞬間を 0 分とし、その後の示差熱膨脹計の読みを縦軸に採つた。こゝで示差熱膨脹計の読み 1 mm 間隔は長さの變化割合 0.001 % に相當する。Fig. 6 (a) は引張加工度 13 %, 焼鈍温度 500° の場合、(b) の曲線 (1) は加工度 29 %, 焼鈍温度 507° の場合である。何れの場合も長さは初め焼鈍時間の増加と共に急に増し、ある時間経過するとその増加は緩慢になる。そして加工度が大きくなると長さの増加が緩慢になるまでに要する時間が短縮されるようである。Fig. 6 (b) の曲線 (2) は引張加工度 29 %, 焼鈍温度 609° の場合で、この場合は 500° の場合とは逆に焼鈍時間の経過と共に長さは減少している。

IV. 結 括

炭素含量 0.15, 0.26 % の低炭素鋼の熱間壓延棒を焼準した後、常温でこれらを引張加工した。次にこれらを種々の温度で焼鈍する場合、焼鈍による長さの變化が如何に起るかを比較測長機および示差熱膨脹計によつて調べた。それらの結果を要約すると次の通りである。

(1) 試片を引張加工せる場合、加工度が增加すると延伸率の増加割合は直径収縮率のそれよりも大きい傾向がある。そして延伸率および直径収縮率から體積變化を計算すると體積は引張加工によつて増加することが解つた。

(2) 加工後焼鈍による長さの變化は、棒の内外において略々同様に起る。

(3) 引張加工せる試片を低温焼鈍すると試片の長さは増加する。その増加率は加工度の増加と共に大きくなるが、著しく局部収縮を起す加工度になると却つて長さの増加率が小となる。

(4) 引張加工せる試片の低温焼鈍による長さの増加率は、焼鈍温度が 500° 附近で極大となる。低炭素鋼の變態點以上で高温焼鈍すれば、試片は加工の有無に拘らず、長さが減少する傾向にある。

(5) 引張加工せる試片を 500° 附近で焼鈍すると、試片の長さは初め焼鈍時間の増加と共に急に増し、30 min~1hr 経過後はその増加が緩慢になる。そして加工度が大きくなると、長さの増加が緩慢になるまでに要する時間が短縮されるようである。焼鈍温度 $600\sim 700^{\circ}$ の場合には 500° 以下の場合とは逆に焼鈍時間の経過と共に長さは減少する。

終りに本研究は文部省科學研究費の交付によつて促進されたことを附記し、謹んで謝意を表する次第である。