常溫塑性加工せる金屬の焼鈍による變形（第4報）
炭素鋼棒の炭素含量の影響について*

關口春次郎** 稻垣道夫**

Harujiro Sekiguchi and Michio Inagaki: Dimensional Changes due to Annealing of Plastically Cold-Worked Metals (4). On Effects of Carbon Content of Carbon Steel Bars.

The dimensional changes due to low temperature annealing of cold-worked low carbon steel bars occur in the same direction as the deformation due to working before annealing, but the dimensional changes of high carbon steel bars occur in the opposite direction to the deformation due to working before annealing. As the authors called the former "the same direction change of dimension due to annealing after plastic deformation", they will call the later "the opposite direction change of dimension due to annealing after plastic deformation". On the dimensional changes due to high temperature annealing of low carbon steel bar, the length decreases and the diameter increases after the annealing, regardless of working or non-working. But the dimensional changes due to high temperature annealing of cold-worked high carbon steel bar occur in the same direction as those due to the low temperature annealing and the percentages of dimensional changes are larger than those in the case of low temperature annealing.

(Received October 26, 1954)

** 名古屋大學工學部

* 1951年4月 本會東京大會に發表

I. 緒 言

低炭素鋼棒を常溫で塑性加工した後の焼鈍による變形については、すでに第 1~3 報において詳細に報告した。その際用いた炭素鋼棒の炭素含量は 0.1~0.28% であった。本報では 0.10~0.84% C を有する各種炭素鋼棒について引張または壓縮加工した後、焼鈍による變形を測定し、加工後の焼鈍による變形におよぼす炭素含量の影響について調べた結果を報告する。

II. 實驗方法

供試材料は Table 1 に示すような化學成分を有する熱間

Table 1 Chemical compositions of used steels. (%)

Composition	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu
Steel								
0.10 % C steel	0.10	0.47	0.30	0.020	0.018	0.30	0.19	0.37
0.28 % "	0.28	0.41	0.02	0.037	0.011	—	—	—
0.56 % "	0.56	0.67	0.06	0.020	0.030	0.04	0.02	0.12
0.84 % "	0.84	0.56	0.15	0.023	0.012	0.23	0.24	0.32

壓延鋼材である。試片の大きさについては引張加工の場合と壓縮加工の場合とを比較するため、引張試片および壓縮試片共に直径を同寸法とし、引張試片の標點距離と壓縮試片の高さと同寸法とした。加工は容量 50 t の Amsler 試験機を用いた。試験機の容量、壓縮の場合の試片の挫屈防止および變形測定の難易を考慮して、0.1% および 0.28% 炭素鋼棒の試片については、直径を 25 mm、引張試片の標點距離または壓縮試片の高さを 50 mm とした。また 0.56% および 0.84% 炭素鋼棒の試片については直径を 20 mm、引張試片の標點距離または壓縮試片の高さを 50 mm とした。引張または壓縮の加工度としては、それぞれ加工後の伸びまたは縮みを加工前の標點距離または高さで除した値で表わし、何れの場合も常に 6% 程度とした。焼鈍による長さの變化 $\Delta l/l$ 、體積の變化 $\Delta V/V$ の測定は第 2 報の通りで、直径の變化は次式によつて計算した。

$$\frac{\Delta d}{d} = \sqrt{\frac{1 + \Delta V/V}{1 + \Delta l/l}} - 1$$

なお試片はすべて加工前に豫め 950° に 1 hr 真空中で焼鈍し爐冷した。また加工後の焼鈍は加工して約 1 週間經過した後真空中で行つた。第 2 報において述べた如く、低炭素鋼棒の低温焼鈍による變形は 500° 附近顯著であるので低温焼鈍としては 500° を選んだ。また高温の焼鈍温度としては A₁~A₃ 變態區間を充分越えた温度 950° を選んだ。加熱および冷却中の長さの測定には、佐藤式膨脹計を用いた。この場合の試片の寸法は直径 5 mm、長さ 84 mm である。

III. 實驗結果

1. 6% 加工せる炭素鋼棒の炭素含量と 500°, 30 min 間焼鈍による變形との關係

500° に 30 min 間焼鈍せる場合、焼鈍による長さの變化割合と炭素含量との關係は Fig. 1 に示す通りである。

(Holding time at 500°: 30 min, Degree of cold-working: 6%)
Fig. 1 Relation between length-change due to annealing at 500° and carbon content of cold-worked carbon steel bars.

曲線 (a) は引張加工した場合、曲線 (b) は壓縮加工した場合で、加工しない試片は曲線 (c) に示すように何れの炭素含量についても長さかほとんど變化しない。引張加工した場合と壓縮加工した場合の 500° 焼鈍による長さの變化は對稱的、互いに反對方向に起る。また炭素含量約 0.55% を境にして、これよりも炭素含量が低い場合と高い場合とでは、長さの變化の方向が反對になる。すなわち炭素

(Holding time at 500°: 30 min, Degree of cold-working: 6%)
Fig. 2 Relation between diameter-change due to annealing at 500° and carbon content of cold-worked carbon steel bars.

含量の低い鋼棒は引張加工後低温焼鈍によつて長さが増加し、壓縮加工後低温焼鈍によつて長さが減少するが、炭素含量の高い鋼棒は反對に引張加工後低温焼鈍によつて長さが減少し、壓縮加工後低温焼鈍によつて長さが増加する。殊に共析鋼棒の焼鈍による長さの變化割合は著しく大きく、低炭素鋼棒の長さの變化割合の絶対値にくらべて一桁大きい。體積の變化割合は一般に僅少で値がヤムバラつく

が、0.28 % および 0.56 % 炭素鋼棒を引張加工後 500° に焼鈍した場合は焼鈍によつて體積が若干増加する傾向にある。壓縮加工した場合は、何れの炭素鋼棒についても、焼鈍によつて體積が減少する傾向にある。Fig. 2 は 500° に 30 min 間焼鈍せる場合の焼鈍による直径の變化割合と炭素含量との關係を示す。これで見ると、直径の變化は長さの變化の方向と反對である。ただし直径變化の方向が逆轉する點の炭素含量は約 0.37 % で、上述の長さの變化の方向が逆轉する點の炭素含量 0.55 % とくらべて低炭素側にずれている。

これらの實驗結果から引張または壓縮加工（加工度 6 %）せる炭素鋼棒を 500° に 30 min 間焼鈍せる場合の焼鈍による變形を要約すると、低炭素鋼棒の低温焼鈍による變形は焼鈍前の塑性加工により起つた變形と同じ方向に起るのに對し、高炭素鋼棒の低温焼鈍による變形は塑性加工により起つた變形と反對方向に起る。前者のような變形に對しては、すでに第 2, 3 報で述べた如く「塑性加工後の焼鈍による同方向寸法變化」と名付けたので、これに對照して後者すなわち「焼鈍による變形が焼鈍前の塑性加工により起つた變形と反對方向に起る」現象を今後「塑性加工後の焼鈍による逆方向寸法變化」と呼稱することにしたい。

Fig. 3 Relation between length-change due to annealing at 950° and carbon content of cold-worked carbon steel bars.

焼鈍による長さの變化割合と炭素含量との關係は Fig. 3 に示す通りである。曲線 (a) は引張加工した場合、曲線 (b) は壓縮加工した場合、曲線 (c) は加工しない場合である。この圖に示すように、炭素含量が約 0.3 % 以下の炭素鋼棒については、加工の有無にかかわらず長さが減少する。すなわち焼鈍前の加工の影響は小さく、たゞ試片の A₁~A₃ 變態區間を越えて加熱冷却したことのみによる長さの減少が主役をなしている。この問題については別報⁽¹⁾

(1) 關口, 稻垣, 加熱及び冷却による炭素鋼棒の變形について: 本誌, 19 (1955), 290等。

において詳細に報告した。炭素含量が約 0.3 % 以上になると、焼鈍前の加工の影響が次第に顯著になつて来る。そ

(Holding time at 950°: 30 min
Degree of cold-working: 6 %)

Fig. 4 Relation between diameter-change due to annealing at 950° and carbon content of cold-worked carbon steel bars.

つその大きさは 950° 焼鈍の場合の方が 500° 焼鈍の場合よりもはるかに大きく約 2 倍になつている。950° 焼鈍による體積變化は、一般に長さの變化に比して僅少で値がやゝバラつくが、體積は 950° 焼鈍によつて減少する傾向にある。Fig. 4 は 950° に 30 min 間焼鈍せる場合の直径の變化割合と炭素含量との關係を示す。曲線 (a) は引張

(Specimen: dia. 5mm, length 83.85mm
Rate of heating and cooling: 6°/min
Holding time at 500°: 30 min)

Fig. 5 Temperature-dilatation curves to 500° for 0.84 % carbon steel bar unworked or elongated.

加工した場合、曲線 (b) は壓縮加工した場合、曲線 (c) は加工しない場合で、直径變化の方向は長さ變化の方向と全く反對になつている。なお焼鈍による直径の變化と長さ

の變化との比は何れの場合もほぼ $-1/2$ に近い。

これらの實驗結果から、引張または壓縮加工 (加工度 6

Fig. 6 Effects of temperature and holding time at 500° on the length-difference between 6% elongated specimen and unworked specimen for 0.84% carbon steel bar.

Fig. 7 Temperature-dilatation curves to 950° for 0.84% carbon steel bar.

%) せる炭素鋼棒を 950° に 30 min 間焼鈍せる場合の焼鈍による變形を要約すると、低炭素鋼棒の高温焼鈍による變形は、加工の有無にかかわらず長さが減少し直径が増加する。また加工した高炭素鋼棒の高温焼鈍による變形は、低温焼鈍による變形の方向と同じで、焼鈍前の塑性加工により起つた變形と反対方向に起り、その變形率は低温焼鈍による變形率よりもはるかに大きい。

2. 共析鋼棒の加熱および冷却中の長さの變化

引張加工した低炭素鋼棒の加熱および冷却

中の長さの變化については、すでに第 1 報で詳述したので「逆方向寸法變化」を起す代表的なものとして共析鋼棒を選び、これについて加熱および冷却中の長さの變化を調べた結果を述べる。

Fig. 5 は 0.84% C、直径 5 mm、長さ 83.85 mm 炭素鋼棒の 500° までの全熱膨脹曲線を示す。曲線 (a) は加工しない場合、曲線 (b) は 6% 引張加工して約 1 ヶ月経過後測定した場合である。引張加工した試片の熱膨脹係数は加熱温度が高くなると小さくなり、500° の一定温度に保持するときは収縮を起し、常温に冷却後の長さは著しく減少している。Fig. 5 の曲線 (a) および (b) の各温度における長さの差を求めてみると、Fig. 6 の (a) のようになる。これで見ると引張加工した試片の加熱および冷却中の収縮の模様がさらに明瞭にわかり、引張加工した試片は加熱温度の上昇とともに収縮するが、300° 附近から収縮が一時停滞し約 350° まで膨脹の傾向が見られる。その後は加熱温度の上昇とともにさらに収縮する。そしてこの

Fig. 8 Effects of temperature and holding time at 950° on the length-difference between 6% elongated specimen and unworked specimen for 0.84% carbon steel bar.

は、引張加工した試片の加熱中における 350° 前後の膨脹の傾向である。これは引張加工した低炭素鋼棒の低温焼鈍による長さの増加とほぼ同一性質のものであろうと推察される。すなわち共析鋼棒も低炭素鋼棒の場合のような變形の傾向があるが、それよりも他の原因で起る反対方向の變形の方が著しく大きいので、冷却後の變形の方向は低炭素鋼棒のそれと反対になると考えられる。

500° に 30 min 間加熱冷却した共析鋼棒をさらに 950° に 30 min 間加熱冷却して、その際の全熱膨脹曲線を求めた

高温における収縮が冷却後常温に持ち來たされる。Fig. 6 の (b) は 500° に保持する時間と長さの減少との關係を示し、一定温度に保持中の長さの減少は初め急速で、約 15 min 経過後は緩慢になることがわかる。

上述の實驗で殊に注目されるの

ものが Fig. 7 である。そして引張加工した場合の曲線 (b) と加工しない場合の曲線 (a) との各温度における長さの差を求めてみると Fig. 8 の (a) のようになる。これらによれば、加熱温度 500° までは以前の 500° 焼鈍によつて十分に長さの変化が起つてしまつたのでもはや長さの変化は起らない。加熱温度が 500° 以上になると、引張加工した共析鋼棒は急激に収縮し、それが変態開始まで続く。変態範囲においては、加工した試片は加工しない試片の変態による収縮と同じような収縮を起さないで、Fig. 8 の (a) に見られるようなピークが現われる。変態通過後は再び収縮するが、その度合は変態前の急激な収縮にくらべて緩やかである。950° に保持する時間と引張加工した試片の長さの変化との関係は、Fig. 8 の (b) に示す通りで、950° においてもなお長さが時間の経過とともに次第に減少して行くことがわかる。

IV. 總 括

以上の結果を纏めると次の通りである。

(1) 加工せる低炭素鋼棒の低温焼鈍による變形は、焼鈍前の塑性加工により起つた變形と同じ方向に起るのに對し、加工せる高炭素鋼棒の低温焼鈍による變形は、焼鈍前の塑性加工により起つた變形と反對方向に起る。前者のような變形に對して著者等はすでに「塑性加工後の焼鈍による同方向寸法變化」と名付けたので、後者に對しては「塑性加工後の焼鈍による逆方向寸法變化」と呼稱したい。

(2) 低炭素鋼棒の高温（變態點以上）焼鈍による變形は、加工の有無にかゝらず、長さが減少し直徑が増加するが、加工せる高炭素鋼棒の高温焼鈍による變形は、低温焼鈍による變形の方向と同じで、變形率は低温焼鈍の場合よりも大きい。

(3) 引張加工した高炭素鋼棒の加熱中の長さの變化の中に、低炭素鋼棒に表わけたような膨脹の傾向が見られた。