常溫塑性加工せる金屬の焼鈍による變形（第5報）

共析鋼棒の組織の影響について*

關口春次郎** 稻垣道夫**

Harujiro Sekiguchi and Michio Inagaki: Dimensional Changes Due to Annealing of Plastically Cold-Worked Metals (5). On the Effect of the Microstructure of Eutectoid Steel Bars. The dimensional changes due to annealing of eutectoid steel bars consisting of lamellar pearlite occur in the opposite direction due to cold-working before annealing. But in the case of eutectoid steel bars consisting of granular pearlite, the dimensional changes occur generally in the same direction as the deformation due to cold-working before annealing. Thus the form of pearlite has an important effect on the dimensional changes due to annealing of cold-worked eutectoid steel bars. The tendencies of hardening due to cold-working and the elastic after-effect in the case of the lamellar pearlite are larger than those in the case of granular pearlite, and the direction of the dimensional change due to annealing after cold-working in the case of the former is the same as the direction of the elastic after-effect at room temperature.

(Received March 22, 1955)

I. 緒 言

著者等はすでに第4報⁽¹⁾において、各種炭素鋼棒の加工後焼鈍による變形について報告した。そして共析鋼棒の低温焼鈍による變形は、低炭素鋼棒のそれと全く反対方向に起ることを述べた。この際用いられた試片はすべて焼準組織のものでパーライトが層状に現れた場合である。本報ではパーライトの形状が加工後の焼鈍による變形に如何に影響するかを調べるために、パーライトのみからなる鋼棒すなわち共析鋼棒を選び、層状パーライトと粒状パーライトの場合について加工後の焼鈍による變形を調べた。

II. 實 驗 方 法

供試材料は下表に示すような化学成分(%)を有する熱間圧延鋼材である。

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.84	0.15	0.56	0.023	0.012	0.32	0.23	0.24

引張加工試片の寸法については直径 20 mm, 平行部の長さ 70 mm, 標點距離 50 mm, 摺み部分の長さ約 50 mm とし、壓縮加工試片の寸法については、直径 17 mm, 高さ 50 mm とした。層状パーライト共析鋼試片は所定の寸法に切削仕上後 950° に 1 hr 真空中で焼準(爐冷)した。粒状パーライト共析鋼試片については略々所定の寸法に切削した後次のように粒状化処理を行い、最後に所定の寸法に切削仕上げして作った。

普通行われている粒状化処理の方法には 4 種類程⁽²⁾⁽³⁾(4)(5)(6)あるが、こゝでは A₁ 變態點の上下に反復緩熱緩冷

(2) 本多, 齋藤, 東北大學理科報告, 9 (1920), 311.

(3) 岩瀬, 本間, 本誌, 4 (1940), 351; 8 (1944), 587.

(4) 近藤, 本誌, 8 (1944), 175 等.

(5) 佐藤, 矢島, 鐵と鋼, 36 (1950), 543 等.

(6) 村上, 本誌, A-14 (1950), No. 6, 11.

** 名古屋大學工學部

* 1953 年 4 月 本會東京大會に發表

(1) 關口, 稻垣, 本誌, 19 (1955), 286.

する方法を採用した すなわち次の (1) 乃至 (5) までは 1 回熱処理としこれを 4 回繰返し行い爐冷した。(1) 室温

(A) Lamellar pearlite (B) Granular pearlite
Photo. 1 Microstructures of eutectoid steel bars consisting of lamellar or granular pearlite.

より 700° まで急速に加熱し 700° に 5 min 保持した後 (2) 700° より 760° まで 1°/min の速度で加熱して (3) 760° に 15 min 保持する。(4) 次に 700° まで 1°/min の速度で冷却し (5) 700° に 30 min 保持する。この方法では良好な粒状パーライトが得られた。その縦断面の顕微鏡組織を層状パーライト組織とともに Photo. 1 に示す。

引張加工度としては塑性伸びを加工前の標点距離で除した値、すなわち $(l-l_0)/l_0 \times 100\%$ (l_0 : 最初の標点間距離, l : 加工して荷重を除去した後の標点間距離) で表わした。また圧縮加工度としては塑性縮みを荷重除去後の高さで除した値、すなわち $(h_0-h)/h \times 100\%$ (h_0 : 最初の高さ, h : 加工して荷重を除去した後の高さ) で表わした。引張加工後の常温における弾性餘効果については熱膨脹計を用いて測定した。加工後の焼鈍による變形の測定方法は第4報⁽¹⁾の通りである。

III. 實驗結果およびその考察

1. 應力-歪曲線

層状および粒状パーライト共析鋼棒を引張または圧縮加工せる場合、應力と歪との關係を一括して示すと Fig. 1 のようになる。引張加工せる場合には、全歪 (弾性歪+塑性歪) すなわち荷重下の延伸率を $\epsilon'_T = (l'-l_0)/l_0$ で表わし (l_0 : 最初の標点間距離, l' : 加工し荷重を除かぬ場合の標点間距離), 圧縮加工せる場合には全歪をここでは特に $\epsilon'_C = (h_0-h')/h'$ で表わした (h_0 : 最初の高さ, h' : 加工し荷重を除かぬ場合の高さ)*。Fig. 1 で見るに引張加工せる場合の真應力-全歪曲線は圧縮加工せる場合のそれとかなり一致している。これについて少しく考察を加えよう。

塑性歪のみを考えた場合の延伸率を ϵ_T とすれば、 $\epsilon_T = \frac{l-l_0}{l_0}$ であり、塑性歪のみを考えた場合の圧縮率を λ_C とすれば、

* 圧縮の場合通常用いられる全歪は荷重下の圧縮率 $= (h_0-h')/h_0$ である。従つてこゝで採用した全歪 ϵ'_C と荷重下の圧縮率との關係は次式で表わされる。荷重下の圧縮率 $= \frac{h'}{h_0} \epsilon'_C$

$$\lambda_C = \frac{h_0-h}{h_0} \quad \text{である。}$$

また引張の場合の有効主變形 (effektive Hauptverformung) は

$$\ln(1+\epsilon_T) = \ln\left(1 + \frac{l-l_0}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right),$$

圧縮の場合の有効主變形は

$$\ln(1-\lambda_C) = \ln\left(1 - \frac{h_0-h}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right).$$

Ludwik によると「最大なる有効主變形の絶対値が等しければ加工硬化の効果は同程度である」⁽⁷⁾。すなわち

$$\ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = -\ln\left(\frac{h}{h_0}\right) = \ln\left(\frac{h_0}{h}\right)$$

$$\text{従つて } \frac{l}{l_0} = \frac{h_0}{h} \quad \text{ゆえに } \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{h_0-h}{h}$$

そこで今塑性歪を考えた場合の歪を圧縮率 λ_C で表わさ

ず、特に $\epsilon_C = \frac{h_0-h}{h}$ で表わすと、

$$\epsilon_T = \epsilon'_C$$

となり、Ludwik によればこの条件の下では ϵ_T に対す

Remarks:—Total strain for tensile stress: Elongation $\epsilon'_T = \frac{l'-l_0}{l_0} \times 100\%$ Total strain for compressive stress: Special strain $\epsilon'_C = \frac{h_0-h'}{h'} \times 100\%$

Fig. 1 True stress-strain curves for eutectoid steel bars consisting of lamellar or granular pearlite.

る加工硬化と ϵ_C に対する加工硬化は同値でなければならぬ。Fig. 1 では横座標として塑性歪をとらず、弾性歪も含んだ全歪をとった。すなわち前述のごとく $\epsilon'_T = (l'-l_0)/l_0$, $\epsilon'_C = (h_0-h')/h'$ を採用している。

しかし Fig. 1 によれば引張全歪 ϵ'_T に対応する真應力と、 ϵ'_T と絶対値の等しい圧縮全歪 ϵ'_C に対応する真應力とはほぼ一

致する傾向にあることが判る。すなわち共析鋼については Ludwik の説は全歪で表わした場合にもかなり適合することが判つた。

層状パーライト共析鋼棒についての真應力は粒状パーライト共析鋼棒についてのそれに較べ同一歪に對して大き
(7) *Praktische Metallkunde*, (von Georg Sacks) Teil II, Spanlose Formung, (1934), 139.

く、その差異は歪の増加とともに著しく増大する。すなわち層状パーライト共析鋼棒は粒状パーライト共析鋼棒に較

Remarks:-Diameter of specimen: 6 mm.

Fig. 2 Elastic after-effect for eutectoid steel bar consisting of lamellar pearlite after plastic elongation (6 %).

べて加工硬化の著しいことがわかる。

2. 弾性餘効果

荷重を除去した直後を出発点としてその後の経過時間と室温における回復歪を熱膨脹計を用いて測定した。この場

Remarks: Holding time at annealing temp. : 30 min
Curve a: for 5.3 % elongated specimens,
Curve b: for 5.5 % compressed specimens.

Fig. 3 Relation between length-change and annealing temperature after cold-working for eutectoid steel bars consisting of lamellar pearlite.

合の試片の直径は 6 mm, 長さは 85 mm であつた。Fig. 2 は 6 % 引張加工した層状パーライト共析鋼棒の弾性餘効果を示している。横軸に室温における経過時間を対数目盛でとり、500 hr すなわち 20 日間

3. 加工後の焼鈍による變形

(1) 層状パーライト共析鋼棒の場合

引張または圧縮加工して数週間経過後、多数の試片を種

Remarks :-Holding time at annealing temp. :30min.
Curve a: for 5.3 % elongated specimens,
Curve b: for 5.5 % compressed specimens.

Fig. 4 Relation between diameter-change and annealing temperature after cold-working for eutectoid steel bars consisting of lamellar pearlite.

々の温度に 30 min 真空中で焼鈍し冷して、焼鈍前後の變形を調べた。引張加工せる場合の塑性歪すなわち加工度は平均 5.3 %, 圧縮加工せる場合のそれは 5.5 % である。Fig. 3 は層状パーライト共析鋼棒について

Remarks: Holding time at annealing temp: 30 min
Curve a: for 5.6 % elongated specimens, Curve b: for 5.8 % compressed specimens.

Fig. 5 Relation between length-change and annealing temperature after cold-working for eutectoid steel bars consisting of granular pearlite.

加工後の焼鈍による變形は焼鈍前の加工による變形の方向と反対方向に起る。かような變形は焼鈍温度約 300° 以上において顯著に起り、A₁ 變態点までは焼鈍温

度の上昇とともに増大する。A₁ 變態點以上の焼鈍温度ではその變形率の増大が緩くなる。層状パーライト共析鋼棒について加工後の焼鈍による體積の變化率は長さおよび直徑の變化率に較べて著しく僅少で一桁以上小さい。そして體積の變化と焼鈍温度との明瞭な傾向は得られなかった。

Remarks:—Holding time at annealing temp.: 30min. Curve a: for 5.6% elongated specimens, Curve b: for 5.8% compressed specimens.

Fig. 6 Relation between volume-change and annealing temperature after cold-working for eutectoid steel bars consisting of granular pearlite.

傾向は得られなかった。

(2) 粒状パーライト共析鋼棒の場合

Remarks:—Holding time at annealing temp.: 30min. Curve a: for 5.6% elongated specimens, Curve b: for 5.8% compressed specimens.

Fig. 7 Relation between diameter-change and annealing temperature after cold-working for eutectoid steel bars consisting of granular pearlite.

のそれは 5.8% である。長さの變化、體積の變化および直徑の變化と焼鈍温度との關係をそれぞれ Fig. 5, Fig. 6 および Fig. 7 に示す。これらの圖からわかる通り、引張加工した粒状パーライト共析鋼棒は焼鈍によつて長さが増加し直徑が減少する。壓縮加工した粒状パーライト共析鋼棒を 500° 以下の温度で焼鈍した場合には、長さおよび直徑に著しい變化は見られないが、それ以上の温度で焼鈍すればその焼鈍によつて長さは減少し直徑は増加する。従つて粒状パーライト共析鋼棒の加工後焼鈍による變形の

方向は層状パーライト共析鋼棒のそれと反対で、焼鈍前の加工による變形の方向と同じである。この點では粒状パーライト共析鋼棒の加工後焼鈍による變形は低炭素鋼棒のそれに類似している。しかし粒状パーライト共析鋼棒の場合、かような變形が A₁ 變態點附近において著しく起るのに対し、低炭素鋼棒の場合は 400~500° において著しく起る。粒状パーライト共析鋼棒の加工後焼鈍による變形の絶対値は概して層状パーライト共析鋼棒のそれよりも小さく、低炭素鋼棒のそれよりも大きい。粒状パーライト共析鋼棒の加工後焼鈍による體積の變化は、一般にその長さおよび直徑の變化に較べて僅少であるが、引張加工した場合には焼鈍によつて體積が減少し、壓縮加工した場合には増加する傾向があるようである。

4. 加工後の焼鈍による變形と弾性餘効果との關係

層状パーライト共析鋼棒については加工して荷重を除去した後の弾性餘効果が著しく、20 日間経過するものなお歪の恢復が續く。そしてその後焼鈍すれば焼鈍による變形は加工による變形の方向と反対方向、すなわち加工歪が恢復する方向に起る。従つて層状パーライト共析鋼棒の加工後焼鈍による變形は室温における弾性餘効果が温度をあげたために一層進行したものと考えられる。粒状パーライト共析鋼棒の焼鈍による變形にも上記のようなことが起り得ると考えられるが、弾性餘効果が層状パーライト共析鋼棒に較べて小さいために、低炭素鋼棒に起つたような「塑性加工後の焼鈍による同方向寸法變化」が支配的に起つたものと思われる。

IV. 總 括

本報の實驗結果を要約すると次の通りである。

(1) 最大なる有効主變形の絶対値が等しければ加工硬化の効果は同程度である」との Ludwik の説は、共析鋼についての歪歪に對しても有効である。

(2) 層状パーライト共析鋼棒と粒状パーライト共析鋼棒の降伏點にはそれ程差異がないが、加工硬化には著しい差異があり、層状パーライト共析鋼棒は粒状パーライト共析鋼棒に較べて加工硬化が大である。

(3) 層状パーライト共析鋼棒を加工して除荷後の室温における弾性餘効果は著しく、20 日間経過するものなお加工歪の恢復が顯著に起る。

(4) 層状パーライト共析鋼棒の加工後焼鈍による變形は、焼鈍前の加工による變形の方向と反対であるが、粒状パーライト共析鋼棒のそれは、概して焼鈍前の加工による變形の方向と同方向である。すなわち粒状パーライト共析鋼棒の焼鈍による變形の方向は、層状パーライト共析鋼棒のそれと反対方向で、かつその絶対値は著しく小さい。

これらの結果から、パーライトの形状が共析鋼棒の加工後の焼鈍による變形に著しく影響することがわかり、パーライトが層状であることが加工硬化を著しく増大させ、塑性域での弾性餘効果を大きくし、焼鈍による變形の方向を室温における弾性餘効果による變形の方向と同じにすると考えられる。

終りに臨み、實驗に當り熱心に協力された工學士柳澤哲彦君に厚く謝意を表す。