塑性變形を興えた軟鋼に及ぼす加熱の影響について*

篠田 軍治** 田 中 実*** 鈴木 和郎***

Gunji Shinoda, Minoru Tanaka and Kazuo Suzuki : The Effect of Annealing upon the Properties of the Plastically Deformed Mild Steel. Effect of heating upon the properties of the plastically deformed mild steel (C=0.23%, Mn=0.09%, P=0.043%, S=0.029%) has been studied using X-ray back reflection method, measurement of hardness by Vickers hardness tester and of length by Universal Measuring Microscope. The curve of Vickers hardness versus temperature has two peaks, the one at 100~300°, the other in range 400~450°. The former may be an effect of "blue shortness." Present authors inquired into the latter phenomenon closely and concluded that it was simply due to the precipitation of Fe₃C.

** 大阪大学精密工学教室

*** 東京工業大学精密機械研究所

* 昭和24年11月本会名古屋大会に発表

After elongation of several per cent, the lattice constant a_{η} , plane of which is nearly parallel to the surface of the specimen, becomes larger than that of the one which is not plastically deformed (i. e., a_0), and the lattice constant $a_{45^\circ-\eta'}$ plane of which is inclined about 45° to the direction of tension, is smaller than a_0 . After heating up to $250\sim 350^\circ$, a_{η} becomes smaller than a_0 . On the other hand, $a_{45^\circ-\eta'}$ becomes larger, but does not exceed the value of a_0 .

By heating up to $400\sim 450^\circ$ both a_{η} and $a_{45^\circ-\eta'}$ tend to approach a value which is smaller than that of a_0 by 0.3%, and this state is maintained up to about 700° .

Moreover, these specimens contract in volume by 0.06% at that temperature.

These facts and also the retardation of softening at these temperatures reveal that the carbon supersaturated in ferrite precipitates in the form of Fe_3C , i. e. precipitation hardening.

(Received May 2, 1950)

I. 緒 言

従来冷間加工を行つた金属材料の加熱による機械的性質及び電気抵抗の変化、あるいは再結晶現象のX線的研究に関する報告⁽¹⁾は数多くなされているが、金属の変形を測定⁽²⁾したものは極めて少ない。著者等はこれらの諸性質の関連性を明らかにせんと試み、常温で引張り加工を興えた0.2%Cの軟鋼について硬度、長さ並びに格子常数に及ぼす加熱の影響の調査を行つた。本文は偶々この試験に際して軟鋼の再結晶開始後の硬化現象が Fe_3C の析出に起因すると推定し得る比較的明瞭な結果を得たのでその概要について報告せんとするものである。本研究は篠田、田中によつて計画され、X線試験は鈴木、他の諸試験は田中が担当し、三者で結果を検討して、田中が本文を執筆した。

II. 試験方法及び結果

試料は電解鉄より溶製した軟鋼棒（直径 15 mm, 秋田製鋼株式会社製）で、その分析結果は 0.23%C, 0.09%Mn, 0.35%Si, 0.043%P, 0.029%S である。試片は直径 5 mm, 長さ 35 mm の平行部とその両端に直径 8 mm, 長さ 20 mm の握み部を有する形状で、何れも 900° , 1 hr 真空中で焼鈍後試験に供した。

塑性変形は 2 ton の Ansler 製引張試験機により極めて徐々に興え、その加工率は予め分割器で試片の平行部に 5 mm 毎に目盛つた標線間の距離の変化量を理研製コンパレーター（精度 0.01 mm）で測定して求めた。なお試片に局部収縮が生じた場合にはこの部分をさけて硬度測定或いはX線照射を行い、測定部の位置する 5 mm の間の変化量をもつて加工率を求めた。周知の如く塑性変形を興えた試片は常温に放置されると時効現象を起す⁽³⁾ので、本試験では大部分の試片を引張り加工後直ちに 100° に 1 hr 加熱して常温時効による性質の変化を防止した。

試片の格子常数は $\text{CoK}\alpha$ 線を使用し、鉄の(310)線を背面反射法によつて撮影して決定した。校正線としては銀粉を試片の表面に塗り、その(420)線を用いた。Fig. 1 は数種の加工率を興えた試片の格子常数とこれから算出した試片の表面の軸方向の残留応力を示したもので、 a_{η} は試片の軸に対して直角にX線を入射せしめた場合(○印)、 $a_{45^\circ-\eta'}$ は軸に対して 45° にX線を入射せしめた場合(×印)の測定

結果である。即ち加工前の焼鈍状態では a_{η} と $a_{45^\circ-\eta'}$ は誤差範囲内で一致しているが、加工率の増加と共に a_{η} は徐々に増大し、 $a_{45^\circ-\eta'}$ は減少し、その変化の割合は $a_{45^\circ-\eta'}$ の方が a_{η} よりやや大となる傾向が認められる。この変化の割合は概略 1:2 になるべきことが予想せられ、測定結果

Fig. 1 Changes in lattice constant and residual stress with elongation.

はこれをほぼ満足している。

試片の表面の軸方向の残留応力は縦圧縮応力で、加工率と共に大体直線的に増大して、加工率 22% の場合に 30 kg/mm^2 程度となる。

次にこれらの試片の中から、加工率 6.0%, 10.8%, 17.9% のものを選び、 200° から 500° まで 50° 毎、 500° から 800° までは 100° 毎に各々 1 hr 加熱後常温において格子常数を測定し、Fig. 2 の如き結果を得た。加熱は 250° まで

Fig. 2 Change in the lattice constant with heating after elongation.

は油、 $300\sim 450^\circ$ は塩浴、 500° 以上は真空炉の中で行つた。Fig. 2 の鎖線(---)は変形前の焼鈍状態の試片の格子常数 a_0 である。即ち引張り加工をうけた試片の a_{η} 及び $a_{45^\circ-\eta'}$ は a_0 よりそれぞれ増大及び減少しており、 250° に加熱後も殆んど変化なくむしろ加工率を増加せしめると

(1) 例えば日本金属学会編「最近の金属学の概観」p. 28, p. 57 参照。

(2) 名大の関口春次郎教授は低炭素鋼の引張或いは圧縮加工後の焼鈍による変形を研究せられている。

(3) 山田良之助, 材料試験法, 内田老鶴圃 (1938), p. 300 参照。

同様の傾向にあるものと認められるが、 $250 \sim 300^\circ$ の加熱によつて a_η は減少し、 $a_{15^\circ-\eta'}$ は増大する。加熱温度が更に高くなると a_η は a_0 よりも小さくなり、 $a_{15^\circ-\eta'}$ もまたこの値に接近し、結局 a_0 より約 0.026% 減少した値で殆んど a_η と $a_{15^\circ-\eta'}$ は一致して、以後 $600^\circ, 700^\circ$ の加熱では変化は認められない。加熱温度を 800° として試料の A_1 変態点以上にすると、試片の格子常数は再び a_0 に近くなる。

この X 線試験と同時に試片の加工後の加熱に伴う硬度及び長さの変化を加工率 4.7%, 7.5% 及び 14.2% のものについて測定した。硬度はヴィカース硬度計で荷重 10 kg とし、試片を V 型台にのせて測定し、各々の加熱段階で 2 ケ所の値の平均を採つた。長さの測定は硬度測定と共通の試片で加熱の各段階において Zeiss 社製万能顕微鏡 (U.M.M) (精度 $\pm 1.5 \mu$) によつて行つた。測定法は著者等の一人⁽⁴⁾ が常用の方法で、所定の加工を與えた試片の平行部に角度 60° 、深さ 0.3 mm の溝を約 28 mm の間隔に 2 本つけ、この溝の間の距離を 8 回測定してその平均を採つた。加熱による長さの変化は引張り加工後の長さを基準にして、この長さに対する変化量を求め、百分率で表示した。

硬度及び長さの測定結果は Fig. 3 及び Fig. 4 の如くである。即ち硬度は焼鈍状態から加工率に應じて増大し、

Fig. 3 Change in the hardness with temperature.

Fig. 4 Change in the length with temperature.

100° の加熱で更に増大する。その増加の割合は加工率の少くなるものに特に著しく認められた。長さの変化はこの硬度上昇に対して幾分膨脹を示している。 200° の加熱で硬度は少しく低下し、 $250^\circ, 300^\circ$ の加熱で再び硬化が起り、 350° の加熱で硬度の減少が認められる。長さの変化は $300 \sim 350^\circ$ の加熱によつて収縮を開始する。 $400 \sim 450^\circ$ の加熱では硬度が上昇し、長さの収縮に極小が認められ、 500° 以上の加熱では次第に軟化の程度が著しくなり、これに伴つて長さは徐々に膨脹する。

(4) 田中実, 東京工業大学学報特別号精密機械研究所所報, 第 2 号 (1914)。

III. 試験結果の考察

W. A. Wood⁽⁵⁾ 等は 99.95% の鉄に引張り加工を行つた後加熱による格子常数の変化を測定した結果、 $300^\circ, 1 \text{ hr}$ の加熱で殆んど加工前の格子常数になつたことを報告している。本試験において、加工試片の格子常数 a_η 及び $a_{15^\circ-\eta'}$ が a_0 に近接し初める加熱温度は、加工率 6.0% 試片で $350^\circ, 10.8\%$ 試片で 350° 及び $300^\circ, 17.9\%$ 試片で 250° となつており、硬度も大体これに対応して $250 \sim 300^\circ$ から低下している。即ち $250 \sim 350^\circ$ からこれら加工試片は再結晶を開始するものと考えられる。

400° 附近の硬化現象に伴つて格子常数は a_0 より約 0.026% の減少が認められ、長さの変化として約 0.02% 即ち 0.06% 程度の体積の収縮が起つている。フェライトの格子常数が固溶炭素量によつて直線的に増大し、その割合がオーステナイトの場合と近似するものと仮定すれば、本多、西山両博士の測定値⁽⁶⁾ から著者等の得た 0.026% の格子常数の減少は 0.019% (重量パーセント) の炭素の析出に相当するものと推定される。また鉄-炭素系平衡状態図⁽⁷⁾ における常温のフェライトの炭素固溶量は約 0.006% と認められているので、本試験に用いた焼鈍試片には、約 0.025% の炭素がフェライトに固溶していたものと考えられ、略々 670° 附近の固溶量に相当することになる。一方 0.025% の炭素原子を固溶したフェライトの比重は 7.869, 0.019% の黒鉛と 0.006% の炭素原子を固溶したフェライトよりなるものゝ比重は 7.867, また 0.019% の炭素に相当する Fe_3C と 0.006% の炭素原子を固溶したフェライトよりなるものゝ比重は 7.873 と計算することが出来る。即ち炭素原子が黒鉛として析出すれば比重は減少することになり、 Fe_3C として析出すれば比重は増大し、0.05% 程度の体積の収縮が予期される。これは本試験によつて得られた格子常数及び長さの変化量が大体一致することを示すもので、 400° 附近の硬化現象はフェライトへ過飽和に固溶した炭素原子が引張り加工とその後の加熱によつて Fe_3C として析出したために起るものと推定することが出来る。

加熱温度が 450° 以上になると軟化が認められ、再結晶が続いているものと考えられ、これに伴つて長さの膨脹は明瞭になるが格子常数の変化は殆んどない。

IV. 結 言

常温で引張り加工を與えた 0.2% C の軟鋼について硬度、長さ及び格子常数に及ぼす加熱の影響を試験した結果を要約すれば次の如くである。

(1) 格子常数は加工率と共にほぼ直線的に変化し、試片の表面の軸方向の残留應力は圧縮應力となり、加工率 22% の場合には 30 kg/mm^2 程度の應力値が得られた。(2) 加工後 250° までの加熱では格子常数の変化は殆んど起らぬが、硬度の増加と長さの膨脹を認めた。(3) 加工後 400° の加熱で硬化が起り、長さの収縮量及び格子常数の変化量からこの硬化が Fe_3C の析出によるものであることを推論した。(4) 再結晶は $250 \sim 350^\circ$ から開始し、 Fe_3C の析出後

(5) S. L. Smith and W. A. Wood, Proc. Roy. Soc., A-178 (1941), 93.

(6) 本多光太郎, 西山善次, 金属の研究, 10 (1933), 1.

(7) 例えば濱住松二郎, 最近鉄鋼と特殊鋼, 内田老鶴圃 (1944), p. 29.

も進行し、著しい軟化と共に長さの膨脹を認めた。(5) 焼鈍状態で 0.025% 程度の炭素原子をフェライトが過飽和に固溶していることを認めた。

本試験は、精密機械研究所長佐々木重雄教授の鞭撻と文部省科学研究費によつて遂行し得たことを附記し厚く感謝の意を表するものである。