應力時効處理による軟鋼の材質の變化について(第3報)^{*} 加工溫度および冷却法の影響

櫻井 忠一^{**} 川崎 正^{**} 泉 久司^{**}

Tadakazu Sakurai, Tadashi Kawasaki and Hisashi Izumi: Changes in Properties of Mild Steel Caused by Stress-aging Treatment (3rd Report). On the Effects of Pre-working Temperature and cooling Method. The results of the present study on the effects of stress-aging treatment upon the static strength of mild steel are as follows: (1) The higher the stress applied to the specimens during stress-aging treatment, the more effective the hardening, but the intensity of stress has little influence on the tensile strength and the yield point, if any. (2) A remarkable increase in hardness and static strength is obtained by pre-straining at temperatures between 250° and 500° before stress-aging at those temperatures, and if rapid cooling after stress-aging treatment is carried out under loading, the hardness and the strength increase still more. (3) The most effective method of improving the static strength of mild steel is to heat the specimen at about 400°, to apply an adequate load to it at that temperature so as to make suitable plastic deformation and then keeping the

^{**} 姫路工業大學

^{*} 1955年10月本會金澤大會に發表.

load constant for a suitable time, cool it rapidly under that load. In this case the most favourable aging time is a function of the aging temperature, and as to the mild steel used here, it is about 5 and 2 minutes for 250° and 400° aging temperatures, respectively.

(Received January 23, 1956)

I. 緒 言

軟鋼に常温で引張加工を加えそのまゝ一定の應力が働いている状態で一定温度に加熱して時効すると、硬度および静的強度が高くなる。この場合時効時間と時効温度の影響について前報⁽¹⁾で報告した。

これまでの処理方法として、Fig. 1 の應力-歪曲線の C

Fig. 1 Ageing stress (σ_A) and pre-straining stress (σ_p)

点まで常温加工し、荷重を除かず試料に σ_p なる應力がかゝつたまゝ直ちに所定の温度まで加熱して一定時間保持し、処理が終れば荷重を除去してから空中放冷した。加熱前に加工して初歪 ϵ_p を與える主なる目的を処理中になるべく高い應力を加えるためである⁽²⁾。C 点(應力 σ_p)まで加工してその應力を一定に保つ場合、殊に時効温度が高

ときには試料が圖の CF の方向にクリープする。このクリープが結果におよぼす影響を調べるために時効應力 (σ_A) を低くして $E_1, E_2 \dots$ のような点で処理を行つてみた。また従来のように C 点まで常温で加工するか、常温以上で加工するか何れが軟鋼の材質改善に對して有効であるか、その他処理後の冷却法など、應力時効処理の最も有効なる方法をみつけるために實驗を行つた。

試料は前報までに用いたのと同じ素材より旋削した 0.22 % C 軟鋼で、荒仕上後 880° で 2 hr 焼鈍して爐冷したものを所定の寸法に仕上げ、その後は焼鈍を行なかつた。しかし仕上後真空中で 800° 1 hr 焼鈍したもの、仕上げたままのものでは硬度が殆ど異ならないので、焼鈍後の加工仕上による加工硬化の影響はないものと考えられる。

II. 實驗方法および結果

處理の方法および装置は第 2 報と同様で、縦型管狀爐をアムスラー萬能試験機に取りつけて爐の中に試料を挿入して、試料の両端は補助棒を通じて試験機のつかみに固定され、所定の荷重を加えて所定の温度に加熱した。處理後常温に冷却してから約 1 hr 後に硬度と磁性を測定し、また約 1 週間後に常温引張試験を行つた。

1. 時効應力の影響

常温加工を行つてから一旦荷重を除去し約 20* 分後に

(1) 櫻井, 川崎, 泉, 本誌, 19(1955), 711.

(2) R. H. Harrington, R. F. Gill & E. A. Smith, J. Inst. Metals, 78(1950), 203.

* 常温加工後應力時効處理を行うまでの放置時間が處理後の材質におよぼす影響は實驗を行つた結果認められなかつた。

Fig. 1 の $E_1, E_2 \dots$ に對應する應力 (σ_A) を加えて應力時効を行い、初歪, 時効温度, 時効時間を一定として時効應力 σ_A が σ_c および硬度におよぼす影響を調べた。Fig. 2

Fig. 2 Relations between σ_c and aging-stress.

は結果の一例で圖の横軸には時効應力を σ_A/σ_p なる比を以て示してある。こゝで σ_p は初歪を與えるに要した應力すなわち Fig. 1 の C 點に對應する應力である。この圖は初歪を 2.5 % として、400°, 2 min, 400° 20 min 及び 250°, 5 min 處理の場合における時効應力の硬度および σ_c におよぼす影響を示すもので、硬度は時効應力の高い程高くなり、 σ_c は σ_A/σ_p が約 0.6~0.8 で最小となる。 σ_c は既

に述べたように⁽³⁾残留應力を示すと考えられるもので、圖の如く時効應力が大きくなるに従い、残留應力は最初次第に低下して極小となり、その後時効應力の増加と共に増加している。處理中に起るクリープを正確には測定してないが、 σ_A/σ_p が約 0.8 以上になると處理中にクリープが起ることが認められるので、 σ_A/σ_p の大きな處で σ_c が時効應力と共に増加するのはクリープの影響で、もしもクリープが起らないとすれば σ_c は時効應力が大きい程圖の點線で示したように減少するものと思われる。

$\sigma_A/\sigma_p = 0$ は時効應力が零、すなわち普通の低温焼鈍の場合であるから、低温焼鈍よりも應力時効處理の方が硬度は遙かに高くなる。

初歪が異なる場合でも、また初歪を常温以上の温度で加えた場合にも Fig. 2 と同じ傾向が見られた。また Fig. 1 の C 點まで加工して荷重を一旦除去してからさらに $E_1, E_2 \dots$ まで荷重を上昇して處理する場合と、C 點から $E_1, E_2 \dots$ まで荷重を低下して處理する場合とを比較してみたが硬度および強度に對して両者の差は全く見られない。しかし後者の場合の方が導磁率が低く、 σ_c が僅か高くなることから、荷重を一旦除去して再荷重する方が残留應力が小さいと考えられる。

2. 常温以上の温度で初歪を與える場合

(3) 篠田, 川崎, 本誌, 18(1954), 305.

以上の実験では、初歪を常温加工によつて与えたが、鋼は常温加工よりも 250~400° で加工した方が静的な強度が高くなることがわかつてるので⁽⁴⁾⁽⁵⁾、強度の向上を目的として常温以上で初歪を与えてから應力時効処理を行つた。用いた試料を常温から 700° までの各温度で 2~10 % の引張加工を加え、直ちに常温に冷却後引張試験を行うと約 350° で加工したものが降伏点、抗張力および硬度が最も高くなり、一方常温から 700° までの各温度で高温引張試験を行うと約 400° で抗張力が最大となるので、初歪を与える温度および時効温度として 250°, 400° および比較のために 500° の 3 種を選んだ。

まず試料を 250° に加熱してその温度で初歪を加え、そのまゝ 5 min 間應力時効を行い荷重を除去してから空中放冷した場合と、従来のように常温で初歪を加えてから 250° で 5 min 應力時効を行つた場合とを比較すると Fig. 3 の

Fig. 3 The effects of working temperature and cooling method on the mechanical properties of stress-aged steel.

- Stress-aged at 250° for 5 min after cold working at 250°.
- Stress-aged at 250° for 5 min after cold working at 250°, and then cooled under the load.
- ×—Stress-aged at 250° for 5 min after cold working at R. T.

Fig. 3 の黒印印で、まず試料を 250° に加熱してから初歪を与え、250° で 5 min 処理し荷重を降さず小型送風機により空気を吹きつけて冷却し、冷却後荷重を除去した場合

如くであつて、降伏点、抗張力および σ_c は何れも前者すなわち 250° で初歪を加えた場合の方が高くなる。しかし硬度は初歪を与える温度には餘り関係がないようである。他の温度で初歪を与えた場合にも Fig. 3 と同じような結果が得られた。この結果から強度の改善に對しては常温以上で初歪を与える方が有効であることがわかる。

元來この処理法は熱と應力とを同時に加えて強度を改善することを目的としているので、初歪を常温以上で与えた方が熱と應力とが同時に働く時間も長いから処理の効果も一層著しくなるのは當然であらう。同じ理由によつて処理後試料を冷却する場合にも荷重を降さず應力のかゝつたままで冷却し、冷却後荷重を除去する方が好ましいと考えられる。実験の結果は

である。圖のように硬度が一層高くなることがわかるが、降伏点と抗張力はこの冷却法による差は認められない。こ

Fig. 4(a) Effect of aging time on the mechanical properties of stress aged specimens.

- ×—Cold working alone (at R. T.).
- Stress-aged at 400° for 2 min after Pre-straining at R. T.
- Stress aged at 400° for 5 min after 400° Pre-straining and aircooled.
- ⊙—10 min Stress aged at 400° after 400° Pre-straining and water cooled.

Fig. 4 (b) Effect of aging time on the magnetic properties of stress-aged specimens.

の場合空気が吹き付けによる試料の冷却速度は正確に測定していないが、250° から常温まで冷却するに要する時間は約 3 min である。冷却速度の影響を調べるために、同様の処理を行つた後、荷重を加えたまゝで空気の代りに 0° の水を試料の周囲から吹きつけた。この場合 250° から常温まで冷却するに要する時間は約 1 min 以下である。水冷の場合の結果を Fig. 3 の白印印で示したが、圖の如く 250° 処理の場合には冷却速度の影響はあまりないようである。

3. 時効温度および時効時間

所定の温度（時効温度）で一定の應力（時効應力）を加えたまゝ保持する時間（時効時間）については第 2 報で述べたが本報では常温以上の温度で初歪を加える場合の最も有効な時効時間と温度について行つた。実験結果は前報の場合と大差はないが、常温以上で初歪を加えた場合の方が効時間の影響が比較的少いようである。Fig. 4 (a) (b) および Fig. 5 (a) (b) は横軸に初歪をとり時効時間をパラメータとしてその結果を

(4) R. F. Miller, Proc. ASTM, 54(1954), 964.

(5) 櫻井, 川崎, 北, 材料試験, 5(1956), No. 34.

表わしたものである。Fig. 4 は 400° で約 2~10 % の初

歪を與え直ちにその温度で 2~10 min 應力時効を行い荷重を除かず一定荷重のもとで冷却した場合で、實驗の範圍内では硬度以外のものは時効時間の影響は非常に僅かであるが、2min の場合に硬度、降伏點および抗張力が最大となる。圖には比較のために點線で常溫加工を與えただけの場合および鎖線で常溫加工後 400° 2 min 應力時効を行つた場合の結果をも示してある。硬度、降伏點および抗張力は何れも、400° で初歪を加えて應力時効を行つたものが最も高くなつてゐる。しかし伸びが低下し、一方導磁率も小さくなり σ_c が高くなるので、機械的強度は高くなるが、同時に残留應力も高くなることが推察される。250° で處理し

Fig. 5(a) Effect of aging time on the mechanical properties of stress-aged specimens.

Fig. 5(b) Effect of aging time on the magnetic properties of stress-aged specimens.

加工後 500° で應力時効をすると σ_c が非常に低下するので残留應力も小さくなることが推察される。しかし Fig. 5 を

た場合にもこの圖と同じような結果が得られた。Fig. 5 (a) (b) は 500° で初歪を加え 500° で 1min および 2min 應力時効を行い荷重を一定に保つたまま水冷した場合の結果で、點線および鎖線はそれぞれ常溫加工のみを與えた場合および常溫加工後 500° 1min 應力時効を行つた場合で、また破線は 500° で高温加工を行つたものである。Fig. 4 の場合と同じように 500° で初歪を加えて應力時効を行つたものが硬度および強度が最も高くなつてゐる。500° 處理の場合、初歪が大きくなると σ_c が低下し、導磁率が高くなるが、これは時効温度が高いので處理中に恢復あるいは再結晶が一部起つたためであると思われる。また前報においても述べた如く、常溫加工

みると 500° で初歪を與えて應力時効を行い荷重を一定に保つたまま冷却した場合には σ_c が常溫加工のみの場合と殆ど變らないから残留應力も両者で同じ程度残ると考えられる。また常溫加工後應力時効したものにして 500° 加工後應力時効したものの方が硬度、降伏點および抗張力が高く保たれるのは、加工温度が高いと變形抵抗が低くなり加工による格子歪も小さいので再結晶温度が高温側へずれ

Fig. 6(a) Results of tensile test for specimens stress-aged at various temperatures for optimum time.

Fig. 6(b) Hardness and magnetic properties of specimens stress-aged at various temperatures for optimum time.

はそれぞれ異なるものであつて、溶質原子の擴散による時効

て⁽⁶⁾軟化が起りにくくなるためであらうと思われる。

時効温度が高いと處理中に起るクリープ量も大きく爐内で破斷することもあるので時効時間を 2 min 以下に制限したが、この程度の時間の差は結果に大きな影響をおよぼさないようである。

時効温度をパラメータとして 250° 5 min, 400° 2 min および 500° 1min 處理の結果を比較すると Fig. 6 (a) (b) のようになつて、初歪の量には関係なく硬度は 400° で最大、降伏點は 250° および 400° で最高となり兩者の値は殆ど變らない。また抗張力は温度が高い程高くなる。何れの場合にも單なる常溫加工のみの場合に比して遙かに高い値を示している。

常溫で加工した軟鋼の歪時効において、硬度、降伏點あるいは抗張力が最大となる時間

(6) 京谷、本誌、19(1955)、255.

現象がそれぞれ機械的性質におよぼす影響は必しも同じ程度で現われるものではないから⁽⁷⁾, Fig. 6 のように硬度降伏点および抗張力を最大ならしめる時効温度が同じ値でないのも當然である. 従つて應力時効処理によつて材質の改善を計らんとする場合にはその目的に應じて適當な時効温度と時効時間とを選ばねばならない.

III. 總括および結言

應力時効処理における處理條件が結果におよぼす影響ならびに處理前の加工法, 處理後の冷却法の影響について實驗を行つたが, 主なる結果を述べると次の如くである.

- (1) 時効應力が大きい程硬度の増加もまた大きくなる.
- (2) 初歪を常温で與えるよりも 250~500° で加工する方が靜的強度と硬度を高めるに一層有効である.
- (3) 處理後荷重を除かず時効應力を一定に保つたまま急冷すると硬度はさらに高くなる.

(7) F. Garafalo & G. W. Smith, Trans. ASM, 47 (1955), 957.

(4) 如何なる機械的性質を改善するかによつてそれぞれ最も適當な時効温度と時効時間とを選ばねばならない.

以上の結果から硬度と降伏点を高めるには 250~400° で初歪を與え, その温度で應力時効を行い荷重を一定に保つたまま急冷することが最も有効で, 抗張力の方は時効温度が高い程 (約 500° まで) は高くなる. この處理によつて單なる常温加工よりは遙かに高い硬度と靜的強度が得られるので, 引拔鋼線, つる巻ばね, 引拔材などに對してその製造工程中にこの處理を施せば強度の向上に極めて有効である.

合金鋼および非鐵合金に對するこの處理の効果ならびに衝擊値および疲れ強度におよぼす影響については引つぎ實驗中である.

本研究に對して絶えず御懇切なる御指導を賜りました大阪大學教授藤田軍治先生に厚くお禮申し上げます.

材料を提供下された川崎製鐵兵庫工場森 繁喜, 作田 裕宜兩氏に對して謝意を表します. なお經費の一部は文部省科學研究費から支辨した.