金屬の冷間加工による硬度および組織分布の變化 ならびにそれに基く諸現象について (第 5 報) 冷間加工による硬度および組織分布 ならびに磁性に及ぼす外力の影響

太 田 和 一*

Waichi Ota: On the Changes in Distribution of Hardness and Structure Caused by the Cold Working of Metals and Some Phenomena Relating to Them (V). The Effect of External Stress Upon the Distribution of Hardness and Structure and Magnetic Properties. The influences of external stresses, such as tensile or compressive stress, upon some properties of cold worked Armco iron were studied. The equalization of hardness and structure, some recovery of magnetic properties and the diminution of residual stresses appeared relating to the addition of external stresses. The amount of the necessary external stress was about one half of the tensile strength, that is, within the elastic limit.

(Received December 7, 1955)

I. ま え が き

冷間加工を行つた材料中の残留應力は不安定で、時効により變化を生じ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾、また、張力を加えた状態で加工すれば残留應力および硬度の分布がある程度緩和され、かつ、その他の諸性質にも變化を生ずる^{(4)~(8)}。特に冷間引拔加工に際し、逆張力を加えると、その残留應力および硬度分布がある程度均等化せられ、従つて加工材の性能は改善せられ、ダイスの磨耗は減少するなどの結果が得られている。すなわち、加工された材料にある外力を加えることによつて、その加工材の性質の一部に變化が起ることを示している。故に著者は冷間加工後の材料に對して外力を加えた場合に、その外力と他の諸性質との關連性を明瞭にせんがため、冷間加工を行つた素材に對して引張應力および壓縮應力を与え、それらの硬度分布および組織分布並びに磁性におよぼす影響について研究した。

II. 試料および實驗法

材料としてはアームコ鐵を用いた。冷間引拔加工材はその加工率の如何に拘らず、壓縮試験片として長さ 100 mm、引張試験片として長さ 200 mm 試料を用いた。また、壓縮板の場合は、幅を 50 mm とし、壓縮試験には長さ 50 mm、引張試験には長さ 200 mm の試料を使用した。引張力および壓縮力は 5 t のアムスラー抗張試験機によつて 5 分間加えた。試片は常に中央部分より採取して把持器および壓縮

面の影響を除くように注意した。

III. 實驗の結果及び考察

1. 冷間引拔加工せるアームコ鐵丸棒に引張應力を加えた場合の硬度分布の變化

Fig. 1 は熱間壓延上り 12.5 mm 丸棒を 9.5 mm 丸棒

Fig. 1 Effect of tension upon the distribution of hardness on the surface and the section of Armco iron bars. (Reduction 42%).

と共に極く僅かに上昇傾向はあるが、これまた中間部同様影響が少い。

次に、素材の加工の程度の影響を知るために、加工率 14.8% の加工せるアームコ鐵丸棒(抗張力 53.5 kg/mm²) について、引張應力と横断面の硬度分布との關係を測定した。その結果、變化の傾向は前者と殆んど同様である。但し、中心部の硬度が降下して中間部の硬度と一致する點、すなわち硬度分布が均等化する場合の引張應力は前者の約 28 kg/mm² に對して後者は約 18 kg/mm² である。このことから、加工率を増せば硬度分布の均等化に要する引張應力が増加することが知られる。

* 東北金屬工業株式會社

- (1) Heyn, J. Inst. Metals, **12** (1914), 3.
- (2) 村田, 日本機械學會誌, **31**(1928), 366.
- (3) 河合, 金屬の研究, **7**(1930), 177.
- (4) 田中, 古河電工時報, 第 5 號(1949), 14.
- (5) 鈴木, 生産技術報告, **1**(1950), No. 3.
- (6) 五弓, 東大, 理工研報告, **3**(1949), 7~8, 203.
- (7) 五弓, 本誌, **16**(1952), 674.
- (8) 五弓, 大山, 本誌, **17**(1953), 40.

かくの如く、冷間引抜加工により不均一な硬度分布を示すものに對して引張應力を加えることによつて硬度は一部

Fig. 2 Effect of tension upon the distribution of hardness on the oblique section of Armco iron bars. (Reduction 42 %).

均等化する。このことを残留應力に関連して見れば、硬度分布に變化が起ることは、外力を加えることによつて冷間加工によつて生じた不安定な残留應力にも變化を與え、減少または消滅することによつて起ると思われる。

なお、硬度分布が均等化するに要する引張應力の値を見るに、Fig. 1

2. 冷間壓延せるアームコ鐵板引張應力を加えた場合の硬度分布の變化

冷間加工による硬度分布状態の異なる壓延板に對して引張應力を加えた場合の影響を知るために、アームコ鐵板について硬度分布を測定した。

Fig. 3 は熱間壓延せる厚さ 6.2 mm のものを 4.1 mm まで冷間壓延加工 (壓延率 33 %) を行つたアームコ鐵板 (抗張力 60.3 kg/mm²) に引張應力を加えた場合の横斷面の硬度分布を示す。また Fig. 4 は同じ試料を壓延方向に斜切りした面の硬度分布を示す。

Fig. 3 Effect of tension upon the distribution of hardness on the section and the surface of Armco iron sheets. (Reduction 33 %).

Fig. 4 Effect of tension upon the distribution of hardness on the oblique surface of Armco iron sheets. (Reduction 33 %).

す。中心部の硬度は引張應力の増加と共に漸次低下して表面部の硬度に近づいて均等化する。

次に、壓延率の影響を明らかにするため、前同様に熱間壓延せる厚さ 6.2 mm のものを 2.6 mm まで冷間壓延 (壓延率 58 %) せる過加工のアームコ鐵板 (抗張力 55 kg/mm²) に對し、引張應力を加えた場合の硬度分布を測定した。その結果は、表面および中心部の中間において僅か 10 kg/mm² の張力によつて硬度分布が均等化することが知られる。次に、スキンパスロールにより 10 % の冷間壓延を施したもの (抗張力 42 kg/mm²) についても實驗を行つたが、その變化の傾向は Fig. 3 および Fig. 4 の場合と全く同様であり、硬度は兩者の中間において均等化する。

以上、壓延板に引張應力を加えることによつて硬度分布が均等化し、かつ残留應力が減少または解消すると思われる場合の引張應力の値は、Fig. 3 の抗張力 60.3 kg/mm² の素材の場合には約 25 kg/mm²、過加工の抗張力 55 kg/mm² の場合には約 10 kg/mm² 並びにスキンパスしたものゝ抗張力 42 kg/mm² の場合においては約 20 kg/mm² を示し、いずれの場合においても、その素材の抗張力の約 1/2 以下、すなわち弾性限界内であると思われる。

3. 冷間引抜加工せるアームコ鐵丸棒に壓縮應力を加えた場合の硬度分布の變化

冷間引抜きおよび冷間壓延されたものに對して、引張應力とは反對の壓縮應力を加える場合の硬度分布およびその他におよぼす影響について研究した。

Fig. 5 および Fig. 6 は、Fig. 1 および Fig. 2 に示したと同様の 42 % 冷間引抜きを行つた素材 (抗張力 58 kg/mm²) に對しそれぞれ異なる壓縮應力を加えた場合の硬度分布を示す。すなわち中心部硬度は壓縮應力の増加と共に低下し、壓縮應力約 28 kg/mm² 位のところにおいて中間部硬度と一致し、その後は餘り變化を示さず、中間部硬度と同一値を示す。表面部硬度は極く僅少なが上昇の傾向を示す。しかし中間部硬度は壓縮應力に左右されずに一定値を示す。また硬度分布が均等化される場合の壓縮應力は、素材抗張力 58 kg/mm² に對し約 28 kg/mm² を示し、素材抗張力の約 1/2、すなわち素材の弾性限界内と思われる。

Fig. 5 Effect of compression upon the distribution of hardness on the surface and the section of Armco iron bars. (Reduction 42 %).

に一定値を示す。また硬度分布が均等化される場合の壓縮應力は、素材抗張力 58 kg/mm² に對し約 28 kg/mm² を示し、素材抗張力の約 1/2、すなわち素材の弾性限界内と思われる。

かくの如く冷間引抜加工せるものに對して壓縮應力を加えた場合、壓縮應力と硬度分布の變化との關係は、同じ素材に對して引張應力を加えた場合と同じ傾向を示し、かつその硬度値も殆んど同一と見られる値を示して變化す

る。なお Fig. 1, Fig. 2 と Fig. 5, Fig. 6 とを比較した場合、外力を加えない引拔素材の表面および中間部の硬度

Fig. 6 Effect of compression upon the distribution of hardness on the oblique section of Armco iron bars. (Reduction 42%).

値に多少の相違のあることは、熱間壓延の際において既に部分的に結晶粒の大きさおよび硬度などに多少差を生じ、それを引抜いた場合においても 5~6 m の長さの試料に部分的に差が現われることが原因していることは既に著者が第 1 報において示してある。かつそれに對して測定誤差も加わるためである。但し、横断面における硬度

分布は全體として同じ傾向になる。このことは、引張力並びに壓縮力は、冷間引拔材の硬度分布および残留應力に對しての結果として全く同様の影響をおよぼすことを知る。

4. 冷間壓延せるアームコ鐵板に壓縮應力を加えた場合の硬度分布の變化

Fig. 7 および Fig. 8 は、冷間壓延せるアームコ鐵板に

Fig. 7 Effect of compression upon the distribution of hardness on the surface and transverse section of Armco iron sheets. (Reduction 33%).

壓縮應力を加えた場合の横断面並びに斜切り面における硬

度分布を示す。圖より明らかな如くに、壓縮應力は硬度分布に對して、同一素材に引張應力を加えた場合の Fig. 3 および Fig. 4 と殆んど同様な影響をおよぼす。すなわちその變化の傾向は勿論、その硬度値までが殆んど同一値を示して變化し、均等化するものであることが明らかに知られる。

Fig. 8 Effect of compression upon the distribution of hardness on the oblique section of Armco iron sheets. (Reduction 33%).

5. 冷間引拔加工せるアームコ鐵に對して引張應力および壓縮應力を加えた場合における顯微鏡組織分布の變化

冷間加工を受けた材料に引張應力或いは壓縮應力などが作用する時には、その硬度分布に均等化を生じ、それに關連して残留應力にも變化が起ることが推察された。しかして、かくの如き變化が起るものとすれば、當然組織状態においても變化が起るように思われる。すなわち加えられた外力は弾性限界内ではあるが、それに對して残留應力が附加されるために局部的には弾性限界を越える力となり、變形を促すものと考えられる。

Photo. 1 および Photo. 2 は熱間壓延せる 12.5 mm 丸棒を 9.5 mm 丸に加工率 42% の冷間引拔きを行つたアームコ鐵丸棒の縦断面における中間部および中心部の組織を示す。すなわち中間部は引拔方向に延伸された纖維狀組織を、中心部は延伸はされていないが、多分に自由結晶狀の角張つた組織を示す。この素材に對して 40 kg/mm² の引張應力を與えた場合の中心部の組織は Photo. 3 の如くである (これ以下の引張力を與えた場合においても組織に變化は起るが、その變化の程度が微弱なためこの例を示す)。この組織を Photo. 2 に比較すれば、素材における自由結晶狀の角張つた組織が消滅し、中間部の組織、すなわ

×100

Photo. 1 The middle part in the longitudinal section of Armco iron, cold drawn from 12.5 mm to 9.5 mm in diameter after hot rolled.

×100

Photo. 2 The central part in the longitudinal section of cold drawn Armco iron bar shown in Photo. 1.

×100

Photo. 3 The central part in the longitudinal section of the same bar as shown in Photo. 2. But the bar was subsequently applied with tension of 40 kg/mm².

×100

Photo. 4 The surface part in the longitudinal section of the same bar as shown in Photo. 1. But the bar was subsequently applied with compression of 40 kg/mm².

ち Photo. 1 と同様な延伸された繊維組織に變化していることが認められる。

中心部の組織にかくの如き變化が起れば、それに對應して表面部および中間部の組織にも變化が起ることが考えられる。Photo. 4 は 40 kg/mm² の壓縮力を加えた試料の表面部の組織を示すものである。すなわち素材における延伸された繊維状組織のものは、逆に不規則な自由結晶状になることが認められる。

以上の事柄から、冷間加工を受けたものに外力が作用することによつて硬度分布の均等化と共に組織的にも變化が起ることが知られ、残留應力も減少または消滅するように思われる。すなわち各部が相互に安定形態に復元するための微細な組織的變化が起る。

6. 冷間壓延せるアームコ鐵板に引張力を加えた場合およびその後焼鈍したもの磁性

著者は比較的內部歪に對して敏感な磁性を測定するため、冷間壓延せるアームコ鐵板を使用して外力による内部歪の變化の狀態と磁性との關係を研究した。

Fig. 9 および Fig. 10 はこれらの實驗の結果の一例を示す。兩圖は、輕度 (10%) の冷間壓延を行つたものに對して引張力を加えた場合およびそれらを 850° 3 hr の焼鈍を行つた場合における磁化 ($B-H$) 線並びに導磁率 ($\mu-H$) 曲線を示す。すなわち、冷間加工により低下せられた磁性は引張力を加えられることにより恢復する。また壓延後張力を加えたものをさらに 850° において 3 hr 焼鈍せ

Fig. 9 Magnetizing curve ($B-H$) of Armco iron sheets. (Reduction 10%).

Fig. 10 Permeability versus magnetic field curves ($\mu-H$) of Armco iron sheets. (Reduction 10%).

る場合においては、引張力を加えないものに比較して良好な磁性を示す。なお壓延率 33% および 58% の素材においてはその變化の傾向は壓延率 10% の場合と同様であるが、引張力による恢復の程度が少くなり、焼鈍せる場合には磁性の差は比較的少い。

以上の結果、冷間加工によつて劣化せる磁性は、それに對して引張力を加えることにより一部恢復することが明らかになつた。このことは外力によつて硬度および組織分布が均等、均質化すると共に、残留應力が減少または解消するためであると思われる。しかし、硬度分布の均等化を示すに必要な張力よりも小なる張力において磁性の恢復率が良好となることはその原因は明らかでないが注目すべき事柄である。

7. 冷間加工によつて生じた残留應力が外力を加えることによつて變化、減少する過程の推察

冷間加工を受けることによつて生じた残留應力は、それに對して引張應力および壓縮應力などの外力を加えることによつて減少または解消せしめ得るものであると考えられることは、硬度および組織分布並びに磁性の變化に基いて推察される。しかし、その外力の強さは素材の抗張力の約 1/2 以下、すなわち弾性限界以内であると思われる。

以上の事柄は、冷間加工材に對して弾性限界内の引張應力を加えた場合に、引張力に残留應力が附加され、表面および中間部の残留應力が張力を受けている部分の弾性限界の強さ以上の應力となつてこの部分に延伸變形を起させ、同時に壓力を受ける中心部分も壓力の減少または消滅によつて延伸變形を起す。また逆に、これらに對して弾性限界内の壓縮力を加えた場合においては、残留應力が壓力を示す中心部分に加わる壓縮力に残留壓縮力が附加されその和がこの部分の弾性限界よりも大きくなり壓縮變形を起す。しかし、残留張力を受けている部分には張力の減少または消滅によつて壓縮變形を起す。かくの如くに、いずれの場合も安定形態に復元することによつて生じていた残留應力が解消するものと考えられる。

IV. 總 括

(1) 冷間加工を受けた材料に牽引張力および壓縮應力の外力を加えることにより、その硬度分布および組織分布が均等化する。

(2) 硬度および組織分布を均等化せしめる外力の強さはその材料の抗張破斷力の約 1/2 或いはそれ以下、すなわち弾性限界内であるように思われる。

(3) 外力の影響は、張力および壓縮力の場合において、その變化の傾向は勿論、數字的にも殆んど等しい値を示すようである。

(4) 冷間壓延せるアームコ鐵板に外力を加え、またはそれらを焼鈍することによりその磁性に相當の影響をおよぼす。

(5) 冷間加工によつて生じた内部残留應力が、それに對して外力を加えることにより變化、減少する過程を推察し

た。

終りに臨み、本研究の發表を許可された會社當局並びに終始御懇切なる御教導と御鞭撻とを賜りました東北大學の

岩瀬慶三先生および磯部満武先生に對し深甚なる感謝の意を表する。なお、本研究の遂行に當り御援助下された柴田梯二郎および岡本西育の兩氏にお禮を申上げる。