引張塑性變形による軟鋼の磁性の變化について*

篠 田 軍 治** 川 崎 正***

Tadashi Kawasaki and Gunji Shinoda : On the Changes of Magnetic Properties of Mild Steel Caused by Plastic Elongation. The changes of magnetic properties of mild steel containing 0.06~0.385 % C caused by plastic elongation were investigated. With the increase of the degree of cold work the permeability of specimen decreases hyperbolically, the steepness of the slope of the magnetization curve decreases also and the intensity of external field required to saturate the specimen increases. Increase of magnetic induction due to the action of elastic tension is observed and it reaches to a maximum and then decreases slowly. If denote by σ_c the elastic tension under which magnetic induction of the specimen we takes a maximum value, when the external tension σ_c works on the specimen all the magnetization curves of cold worked specimen coincided with that of the annealed specimen. The value of σ_c increases by cold working and we obtained the following relation between σ_c and the degree of cold working, ε . $\sigma_c = \alpha \log \varepsilon + \beta$ where α and β are constants depending mainly upon the carbon content of the specimen. Both α and β increased proportionally with the carbon content. If μ_0 is the initial and $\mu_{\max}$ the maximum permeability, the following relations were obtained, $\mu_0 \sigma = k_1$, $\mu_{\max} \sigma_c = k_2$ where k_1 and k_2 are constants independent of the carbon content. These results coincide qualitatively with the theoretical relation between the initial permeability and internal stress which is deduced by Becker and Kersten. Since there are such regular relations between σ_c and the degree of cold working and between σ_c and the permeability deduced from our results, it may be possible to conclude that σ_c is a measure of residual stress caused by plastic deformation.

(Received December 17, 1953)

I. 緒 言

塑性變形を與えた軟鋼の磁性におよぼす焼鈍の影響に関する二三の結果をすでに発表した⁽¹⁾。こゝでは炭素鋼を塑性的に引張つた場合の磁性の變化について述べる。

用いた試料は 0.06 % ~ 0.385 % C の鋼で、これを $10^4 \times 200$ に仕上げ 950° で 2 時間焼鈍してそれを標準の状態と考えることにした。試料の塑性引張變形はアムスラー萬能試験機によつて行い、加工の程度は局部収縮が起り始める迄を限度としたので得られた最大の加工度は約 20 % 前後である。磁氣測定は弾動檢流計法によつた。

II. 實 驗 結 果

1. 磁 化 曲 線

磁化曲線はすでに知られているように、塑性變形によつてその傾斜がゆるやかになり、飽和に要する磁場の値が大きくなる。この傾向は炭素含有量の多いもの程著しいものである。また降伏現象が完了する前の極く僅かな永久伸に對しても明らかに導磁率の低下と磁化曲線の變化が認められた。Fig. 1(a) は加工度による磁化曲線の變化の一例で實線は標準状態の曲線である。

各加工状態の試料にそのときの σ_c に等しい弾性張力を加えると Fig. 1(b) に示したように磁化曲線は各試料の標準状態のものに標準状態における σ_c を加えた場合の磁化曲線にほとんど重なることがわかつた。この重なりは磁場の小さい範圍ではほとんど完全と思われるが飽和域においては加工度の増加につれてずれてくる。その傾向は加工度

** 大阪大學工學部, *** 姫路工業大學

* 1952年4月本會東京大會に發表。

(1) 篠田, 川崎, 本誌, B-14 (1950), No. 8; B-15 (1951), 199.

の大なる程、炭素量の大なる程著しい。

2. B- σ 曲線

Fig. 1 (a) B-H curves for various states cold working. Solid line shows B-H curve of normal state.

Fig. 2(a) B- σ curves of a specimen containing 0.06 % C for various degrees of cold work. σ_c denotes the yield point.

Fig. 1 (b) When the external tension σ_c is applied to the specimen all the magnetization curves coincide with each other.

Fig. 2(b) The curves show that ΔB , $\Delta\sigma$ and σ_c are function of magnetization state. Carbon content of the specimen: 0.06%.

標準状態の試料では降伏点以下の弾性張力による磁気感應 B の変化は極く僅かであるが、加工を與えたものでは弾性應力によつて B は著しく變化するようになる。一例として炭素量 0.060 % の試料に對する結果を Fig 2(a) 各状態の降伏点直下迄引張つた場合應力 σ による B の變化を示した。B- σ 曲線は B の値そのものによつても、すなわち磁化状態によつても圖の如くその形が異つており、加工の影響は B の小さい値において顯著である。また炭素量の多いもの程加工の影響が著しく、炭素量 0.23 % 以上の試料では、加工度が大きくなると B- σ 曲線が B の値の小さい處で一つの彎曲點を持つようになる。この彎曲點は炭素の少い試料では表れなかつた。

B- σ 曲線の形が B の値によつて變るから、 ΔB 、 $\Delta\sigma$ も當然 B の値によつて變化する。 ΔB および $\Delta\sigma$ と B との關係を Fig. 2(b) に示した。こゝで横軸は B の代りに B/B_s をとり B_s は磁気感應の飽和値である。 Δ の値は圖の如く、炭素量、加工度に關係なく $B/B_s \approx 0.6$ で最大となり、これは Fe-Ni 合金に對する Bozorth⁽²⁾ の結果と一致する。また實驗の結果によると ΔB の最大 ΔB_{max} を與える B の値も標準状態の各試料では

Fig. 3 When the specimen are cold worked, the induction B at which ΔB gives a maximum value falls hyperbhorically from its initial value.

$B/B_s \approx 0.6$ であつてしかもこのとき導磁率も最大となつてゐる。すなわち磁化ベクトルの不連続回轉域の終りに相當するような磁化状態で、 ΔB 、 $\Delta\sigma$ 、導磁率が何れも最大となることがわかる。しかし加工を受けた試料では加工度が増

(2) R. M. Bozorth, Rev. Mod. Phys., 17(1945), 72.

加するにつれて $\Delta B_{\max}$ の値が大きくなると同時に ΔB の最大を與える B の値が B の小さい方へずれてゆき、逆に最大導磁率を與える B の値は大きい方へずれてゆく。今 ΔB の最大を與える B と永伸率 $\varepsilon\%$ との關係を圖に示すと Fig. 3 が得られ、圖の縦軸は ΔB の最大を與える B の値を B/B_s で表わしてある。すなわち ΔB が最大となる B の値は加工によつて急に減少して、試料の炭素量には無關係に $\varepsilon=4\%$ 以上では一定となり、その値は $B/B_s \approx 0.3$ である。

Fig. 4 The curves showing the changes of σ_c , hardness (Rockwell "B"), maximum strain sensitivity (Gaus per kg/mm²), $\Delta B_{\max}$ (Gaus) and permeability caused by cold working.

3. σ_c

前報⁽³⁾にも述べたように σ_c は B - σ 曲線において B の最大を與える弾性張力 (kg/mm²) で、標準状態ではその値が降伏點のほぼ半分程度である。また加工を與えた試料に σ_c だけの張力を加えると磁化曲線が標準状態の曲線に一致するようになる。加工後では σ_c は B の値によつて多少變るがその平均値をその加工状態における σ_c の値として、 σ_c と加工度との關係を示すと Fig. 4 および Fig. 5 が得られた。すなわち σ_c と $\log \varepsilon$ との間には直線的な關係があることがわかる。従つて今 α, β を材料によつて定つた常數とすれば次ぎの式が成立する。

$$\sigma_c = \alpha \log \varepsilon + \beta \dots \dots \dots (1)$$

Fig. 5 の曲線群から試料に對する二つの常數 α および β を求め、これらと試料の炭素との關係を示すと Fig. 6 の

ように α, β はともに炭素量に比例して増加する。上の式 (1) から σ_c を計算した直線を Fig. 5 に點線で示して

Fig. 5 σ_c against residual elongation for specimens of various carbon contents. There exists linear relations between σ_c and $\log \varepsilon$.

Fig. 6 Constant α and β against carbon contents.

をとりその後徐々に減少している。

III. 結果に對する考察

塑性變形によつて加工硬化を起し、内部に起つた試料に σ_c だけの弾性張力を加えたときに磁化曲線が加工を受けていない試料の磁化曲線に重なってくるということは興味あることと思われる。充分焼鈍した試料では機械的な應力はほとんど存在しないであろうから軟鋼中の鐵原子は平面的に考えると正方形の格子を形成する。しかし一度塑性變形を受けると試料内には機械的な應力が殘留して最初正方形であつた格子が、菱形または矩形に歪んだ状態におかれるであろう。この状態では正方形に比して格子の幾何學的對稱性が低いから磁區の磁化ベクトルが外部磁場の働きに對して回轉しにくくなるので、これが加工による導磁率低下の一つの原因と考えられる。

次ぎに歪んだ状態にあるものが外部張力を受けると歪の

いたが何れも實測値と可成りよく一致している。

4. 磁氣的諸量ならびに硬度

導磁率、最大歪感度、 $\Delta B_{\max}$ および硬度の加工による變化を示すと前の Fig. 4 の通りで、諸曲線の傾向は用いた試料の範圍では炭素量にはほとんど關係がないので、圖には結果の一つを掲げた。導磁率は加工の増加に従つて双曲線的に減少し、 $\Delta B_{\max}$ は加工の初め部分では急激に増加するが、炭素量には無關係に加工度 4~6 % で限界値に達しその値は約 6000 ガウスである。

最大歪感度の測定値は多少ばらつ

ているが、大體の傾向として初め加工の増加によつて急に増加して極大値をとりその後徐々に減少している。

状態は當然変化し、ちょうど外部張力の値が σ_c に等しくなつたときに、格子が正方形である状態の試料が標準状態の σ_c を受けている場合とほぼ同じような歪状態になるために両者の磁化曲線が一致すると考えられる。加工度が高い場合、炭素量の多い試料では二つの磁化曲線の一致が不完全である。殊に飽和域においてその傾向が著しいが、これは厳しいたりに試料内部の到る處で数多く起るために、残留歪が張力によつて最初の状態に完全に復し得ないからであらう。

強磁性體の磁性は結晶格子の單なる歪のみならず、不純物、合金原子に基づく格子歪、轉位その他の格子欠陥に極めて敏感なものであるから以上の考えは甚だ粗雑ではあるが、かような格子の歪が磁性の變化に對して一つの寄與となることはうなづける。この考えから σ_c なるものが、塑性變形を受けた材料に残留する機械的應力の一つの尺度と考えられる。一方においてよく知られているように初導磁率 μ_0 と内部應力 σ_i との間には

$$\mu_0 = 1 + \frac{8\pi}{9} \frac{I_s^2}{\lambda \sigma_i} \quad (2)$$

なる關係が成立し⁽⁴⁾、ここで I_s は磁化の飽和値、 λ は等方磁歪の飽和値である。式 (2) は

$$\mu_0 \cong \frac{8\pi}{9} \frac{I_s^2}{\lambda \sigma_i} \quad (3)$$

と書いて差支えないから初導磁率は内部應力に逆比例する

Fig. 7 Initial and maximum permeability against σ_c for the specimens of various carbon contents.

ように測定値はほとんど總て對數方目紙上で 45° の傾きを持った直線上に載るから k_1, k_2 をそれぞれ常數とすれば次ぎの二つの式が成立する。

$$\mu_0 \sigma_c = k_1, \quad \mu_{\max} \sigma_c = k_2 \quad (4)$$

すなわち μ_0 も $\mu_{\max}$ もともに σ_c に逆比例している。

(4) Becker u. Kersten, Z. Phys., 64 (1930), 660.

各炭素量の試料から得られた實驗結果から (4) 式の常數 k_1, k_2 を計算してみると Fig. 8 の如くなり炭素量には無關係に

$$k_1 \cong 2000, \quad k_2 \cong 5000. \quad (5)$$

となる (ただし σ_c : kg/mm²)

一方 (3) 式で純鐵に對する常數 $I_s = 1,714(*)$, $\lambda = 1.9 \times 10^{-5}(**)$ を用いて, σ_i の單位を kg/mm² として μ_0, σ_i を計算すると

$$\mu_0 \tau_i = \frac{8\pi}{9} \frac{I_s^2}{\lambda} \cong 4400 \quad (6)$$

Fig. 8 Showing that the constant k_1 and k_2 independent on carbon contents.

この値と (5) 式の k_1 の値とは相当喰違いがあがあるが、これはこの實驗では、測定の都合上磁化コイルの長さが試

料の長さ に比して短かくて試料に一樣な磁場を與えることは困難であり、また反磁場の影響を嚴密に計算することも困難であるために導磁率の計算に當つては、磁氣感應の値を外部磁場の平均値で除したものを採用してあること、また試料は純鐵でないことに原因すると思われる。しかし磁氣測定が可成り粗雑ではあるが、實驗的に (4) 式が成立することは以上の考察により、 σ_c が試料の内部應力の或る尺度であるといつてよからう。

鋼の導磁率は炭素量の増加とともに一般に双曲線的に減少⁽⁵⁾するが式 (4) の常數が炭素量に無關係であることから、鋼の導磁率が炭素量の増加によつて減少する原因も炭素原子による鐵格子の歪であると考えられる。

IV. 結 言

軟鋼に引張塑性變形を與えた場合の磁性の變化について實驗を行つたが、加工度と σ_c 、導磁率と σ_c との間に極めて規則的な關係があることがわかつた。磁氣-弾性についてさらに嚴密な研究を行つて σ_c が何ものであるかを調べる必要があるが、これが、材料に残留する機械的應力の一つの尺度であることは確かであらう。

終りに材料を提供下された川崎製鐵兵庫工場の作田裕宣氏に謝意を表します。

(*) Bozorth, Ferromagnetism (1951), D. Van Nostrand Co. p. 54.

(**) 本多, 最新金屬學大系, 1 (1943), 414.

(5) 淺川, 日本機械學會誌, 30 (1927), 490.