

Fe - Cr - Co 系合金の抵抗歪率におよぼす熱処理の影響について*

増 本 量** 中 村 直 司**

Hakaru Masumoto and Naoji Nakamura : Effect of Heat Treatment on the Strain Gauge Factor of the Fe-Cr-Co System. Fe-Cr-Co alloys containing less than 30% chromium and less than 70% cobalt were heated in vacuum over the temperature range of 500~1000°C for 1h and then furnace-cooled after cold-drawing by about 98% reduction in area. Measurements of the strain gauge factor and electrical properties at room temperature were carried out for the alloys.

Generally, with increasing annealing temperature, the strain gauge factors of the Fe-Cr-Co alloys decreased gradually to a minimum at about 500°C and increased sharply to a maximum at 800°C. In this system, an Fe-15% Cr-30% Co alloy showed a maximum strain gauge factor of 7.3, and an electrical resistivity of $0.78 \mu \Omega \text{ m}$ at room temperature and its temperature coefficient of $100 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$. The thermo-electromotive force relative to copper was $-1.2 \mu \text{ V}/^\circ\text{C}$ for this alloy.

(Received April 30, 1977)

** 財団法人電気磁気材料研究所(The Research Institute of Electric and Magnetic Alloys, 2-1-1, Yagiya-minami, Sendai)

* 1974年11月金属学会東大阪大会に発表; 財団法人電気磁気材料研究所研究報告第101号

I. 緒 言

著者らは先に強冷間線引加工を施した Fe-Cr 系合金について実験を行い、Fe-20% Cr 合金が室温において 6.2 の大きな抵抗歪率†と約 34×10^{-4} の大きな電気抵抗の温度係数を有することを見いだした⁽¹⁾。その後つづいて Fe-Cr 系合金の特性に対する Co あるいは Ni 添加の影響について研究を行い、Fe-15% Cr-35% Co 合金においては 3.9 および 2.6×10^{-4} 、また Fe-10% Cr-20% Ni 合金においては 3.7 および 3.0×10^{-4} のそれぞれ抵抗歪率および電気抵抗の温度係数が得られた⁽²⁾。著者らおよび斎藤はさらに進んで上述の Fe-Cr-Co 系の Cr を Mn で置換した Fe-Co-Mn 系の γ 相を主体とした合金についても研究を行い、Fe-30% Co-45% Mn 合金の抵抗歪率および電気抵抗の温度係数がそれぞれ 4.6 および 2.4×10^{-4} の値を示すことを見いだした⁽³⁾。

しかし上述の値はいずれも強冷間加工を施したままの状態を得られたものなので、実用上は不安定なひずみを除去した場合の特性を知ることが必要である。そこで今回は Fe-Cr-Co 系合金について抵抗歪率が熱処理を行うことによっていかに変化するかを研究した。

II. 試料ならびに実験方法

合金を造るに用いた Fe, Cr および Co の純度は前報⁽²⁾と同様である。

試料の造り方は前報と同じであるが、その概略について説明すると、まず全重量 100 g のうち Fe および Co をアルミナ坩堝に入れ酸化を防ぐため表面に水素ガスを吹きつけながら高周波誘導電気炉を用いて溶かした。ついでこれに Cr を投入してよく攪拌し均質な熔融合金とした。さらにこれに Mn 0.5% および Si 0.3% を添加してよく攪拌して脱酸脱硫を行った。その熔融合金は内径 10 mm、高さ 120 mm の鉄型に鋳込み、その造塊を約 1000°C で鍛造して直径 5 mm の丸棒にした。つぎにこれにスエージングならびに冷間引抜きにより加工率約 98% の冷間加工を施し、直径 0.061 mm の細線とし、最後にそれから長さ 10, 70 および 100 cm の試料を切りとった。

試料は一般には真空中において 500~1000°C の温度で 1 h 加熱後炉中冷却を行ったが、特に X 線分析に用いた試料はその表面の酸化を防ぐために H₂ ガス雰囲気中で焼鈍した。そして長さ 10, 70 および 100 cm の試料は電位差計法によりそれぞれ比電気抵抗 ρ 、抵抗歪率 K および対銅熱起電力 E_{mf} の測定に用いた。また試料の結晶構造は

† 一般に金属細線または箔の電気抵抗は引張りあるいは圧縮などの変形により変化し、その変化量は $K = (dR/R)/(dL/L) = 1 + 2\sigma + (d\rho/\rho)/(dL/L)$ で表わされる。この K がいわゆる抵抗歪率とよばれるものである。ここで R, L, σ および ρ はそれぞれ材料の全抵抗、長さ、ポアソン比および比電気抵抗である。

ディフラクトメーター法による X 線回折 (Mo $K\alpha$ 線) により決定した。

III. 測定結果ならびに考察

1. 抵抗歪率

Fig.1 は前報⁽²⁾の実験結果で約 98% の冷間線引加工を施した Fe-Cr-Co 系合金の K と組成との関係を示してある。図にみるように K の値は Fe:Cr=4:1 の組成線に沿って 1 つの山脈をなしており、その峰の高さは Co 含有量とともに漸次下降している。そしてこの山脈はほぼ ($\alpha + \epsilon$) 相の細長い範囲に沿って走っているため、 K は合金の組織とかなり密接な関係があるものと考えられる。

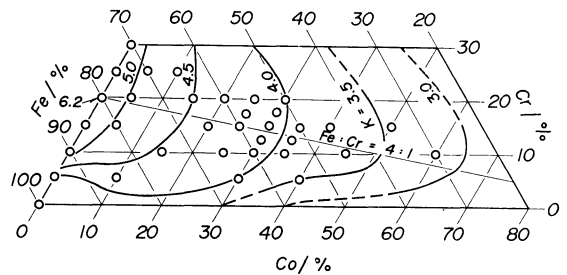


Fig.1 Strain gauge factor at room temperature for Fe-Cr-Co alloys cold-worked by about 98% reduction.

つぎには本実験の結果について述べる。Fig.2 は 500°C で 1 h 焼鈍した場合で、 K は Fe-20% Cr 合金における極大の他に Cr 15% および Co 35% の組成においても極大が現われている。800°C で焼鈍を行うと Fig.3 にみるように Fe-Cr 2 元系側における K の極大は小さくなるが、Co 30% 付近における極大は 500°C で焼鈍した場合より非常に大きくなり、その最高値は 7.3 にも達する。さらに焼鈍温度があり 1000°C × 1 h となると、Fig.4 に示すように極大は小さくなる。

Fig.5 は Cr 15% を含む Fe-Cr-Co 合金について、焼鈍温度を変えたときの Co 添加量に対する K の値を示している。加工状態における K は Co 量が増すにしたがってはじめ急に後ゆるやかにほぼ直線的に減少している。こ

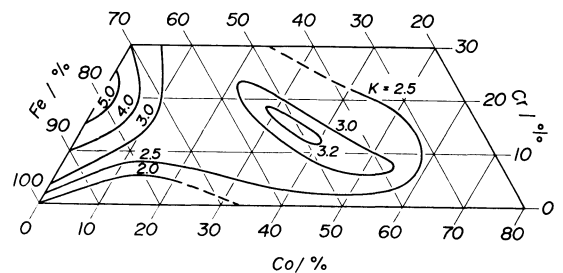


Fig.2 Strain gauge factor of Fe-Cr-Co alloys annealed at 500°C for 1 h after cold-working.

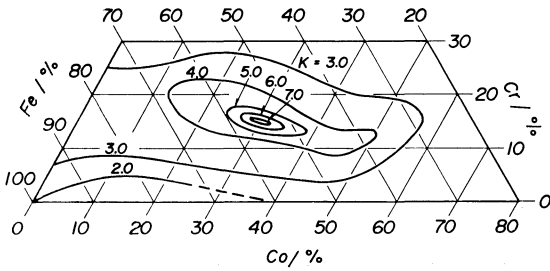


Fig. 3 Strain gauge factor of Fe-Cr-Co alloys annealed at 800°C for 1 h after cold-working.

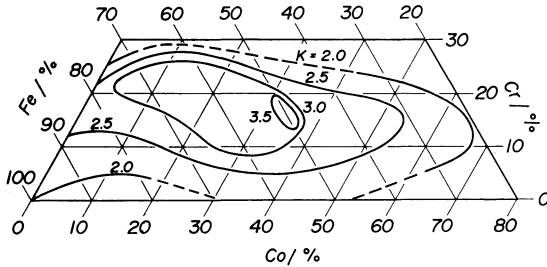


Fig. 4 Strain gauge factor of Fe-Cr-Co alloys annealed at 1000°C for 1 h after cold-working.

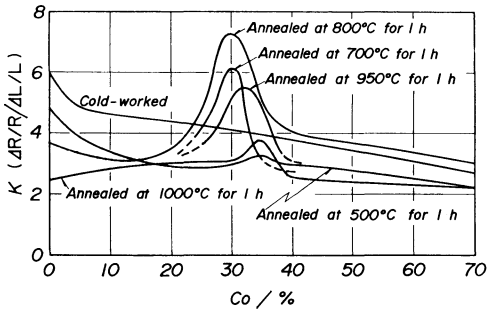


Fig. 5 Effect of heat treatments on strain gauge factor in Fe-Cr-Co alloys containing 15% chromium.

れに対して焼鈍状態ではいずれの焼鈍温度においても Co 30~35% の組成で極大がみられる。そしてこの極大は焼鈍温度が高くなるとともに増大し、800°C で最大に達した後しだいに小さくなる。

Fig. 6 には冷間加工状態と 800°C で焼鈍した状態の Fe-15% Cr-30% Co 合金および焼鈍状態の Ni-57% Cu 合金につき室温における長さの変化 $\Delta L/L$ と抵抗歪率 K および電気抵抗の変化 $\Delta R/R$ との関係が示してある。Ni-57% Cu 合金の $\Delta R/R$ は $\Delta L/L$ に対して非常に広範囲に直線的に変化しているが、Fe-15% Cr-30% Co 合金においては直線部分が非常に少い。すなわち Fe-15% Cr-30% Co 合金の K は $\Delta L/L$ において、加工状態では 0.7% 以下、800°C 焼鈍状態では 0.8% 以下でほぼ一定値を示している。

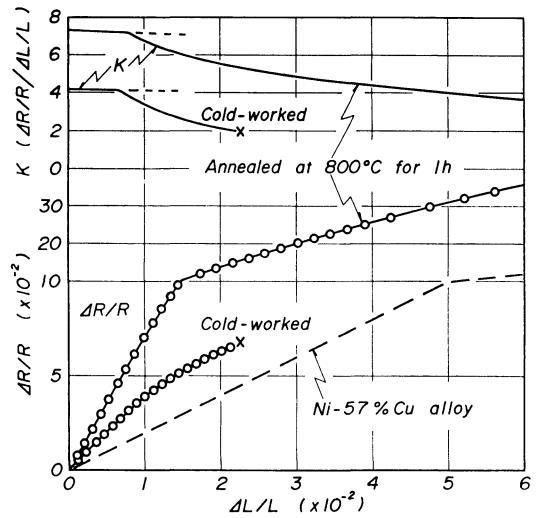


Fig. 6 Relation between resistance change or strain gauge factor and length change at room temperature for Fe-15% Cr-30% Co alloy (solid line) and Ni-57% Cu alloy (broken line).

2. 電気的性質

Fig. 7 は代表的な Fe-15% Cr-30% Co 合金について室温における抵抗歪率、20°C における比電気抵抗、0~40°C における平均の比電気抵抗の温度係数および 0~40°C における平均の対銅熱起電力と焼鈍温度との関係を示している。

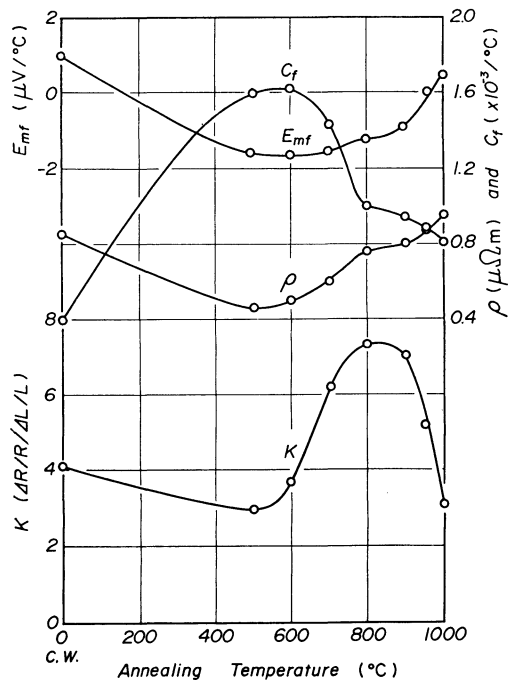


Fig. 7 Relation between strain gauge factor or electrical properties and annealing temperatures (holding time of 1 h) for Fe-15% Cr-30% Co alloy cold-worked by about 98% reduction.

る。図にみるように、いずれの特性も 500~600°C 付近において極小あるいは極大を示し、800°C 付近で極大あるいは折点を示している。そして最大の K は 7.3 という大きな値で、これに対応する ρ , C_f および E_{mf} の値はそれぞれ $0.78 \mu\Omega \text{ m}$, $100 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ および $-1.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ である。

3. X線回折

抵抗歪率が 1000°C 以下の温度で焼鈍することによって著しく変化するのでその原因を究明するために X線回折を行った。Fig. 8 は冷間線引加工状態と 500, 600, 800 および 1000°C で焼鈍した状態の Fe-15%Cr-30%Co 合金について、Bragg 角 2θ が 15° から 50° の範囲で得られた X線回折図を示している。図でみるように加工状態 (a) と 500°C で焼鈍した状態 (b) では α -Fe と同様な bcc 型単相の回折線しか認められないが、ただ 500°C の焼鈍状態では加工

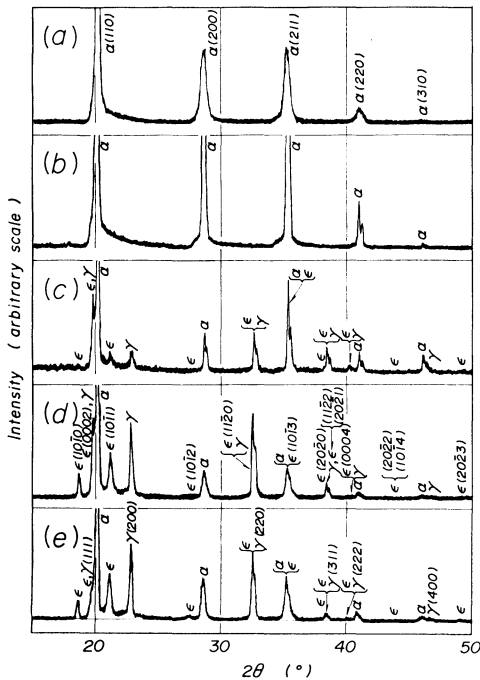


Fig. 8 X-ray diffraction patterns obtained with Mo $K\alpha$ radiation for an Fe-15%Cr-30%Co alloy.

- (a) cold-worked
 (b) annealed at 500°C × 1 h after cold-working
 (c) annealed at 600°C × 1 h after cold-working
 (d) annealed at 800°C × 1 h after cold-working
 (e) annealed at 1000°C × 1 h after cold-working

状態に比べてすべての回折線が鋭くなり $K\alpha_1$ と $K\alpha_2$ は明確に分離している。これは内部応力が除去される過程にあることを示すものである。つぎに 600°C (c) で焼鈍すると γ 相 (fcc) および ϵ 相 (hcp) の回折線が若干出現し、さらに 800°C (d) および 1000°C (e) で焼鈍した状態ではこれら両相は明瞭に出現しているのがわかる。

要するに冷間線引した Fe-15%Cr-30%Co 合金の焼鈍温度を上げてゆくと、内部応力が除去されてゆくために K が漸次減少し、500°C 付近の温度をこえると α 相の地に γ 相および ϵ 相が析出し、内部応力の異常な増加とともに K が著しく増大する。最後にこれを 1000°C で焼鈍すると析出した両相の成長とともに内部応力が除去されるために K が急激に減少するものと思われる。

IV. 総括

約 98% 冷間線引後、真空中 500~1000°C の温度で 1 h 加熱し炉中冷却した Cr 30% 以下および Co 70% 以下を含む Fe-Cr-Co 系合金について室温における抵抗歪率および電気的特性の測定を行い、つぎの結果を得た。

(1) 冷間加工した Fe-Cr-Co 系合金の抵抗歪率は一般に焼鈍温度が高くなるにしたがい漸次減少し、500°C 付近の最低値を経た後急激に増大して 800°C の最高値に達する。さらに焼鈍温度があがり 1000°C になるとその値は急激に小さくなる。

(2) 抵抗歪率の最高値 7.3 を示す Fe-15%Cr-30%Co 合金の室温における比電気抵抗、その温度係数および対銅熱起電力はそれぞれ $0.78 \mu\Omega \text{ m}$, $100 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ および $-1.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ である。

(3) 抵抗歪率の最高値 7.3 を示す Fe-15%Cr-30%Co 合金の長さの変化に対する電気抵抗の変化の比が一定である範囲は 0.8% で、現在使用されている合金のそれに比して非常に狭い。

(4) X線回折を行った結果、冷間加工した Fe-15%Cr-30%Co 合金は常温では α 単相 (bcc) であるが、焼鈍温度が 500°C をこえると α 相の地に γ 相 (fcc) および ϵ 相 (hcp) が析出する。これら両相の析出により内部応力が異常に増加し、抵抗歪率が著しく増大するものと考えられる。

文 献

- (1) 増本 量, 中村直司: 金属学会誌, **32**(1968), 681; Trans. JIM, **10**(1969), 124.
 (2) 増本 量, 中村直司: 金属学会誌, **32**(1968), 852; Trans. JIM, **10**(1969), 128.
 (3) 増本 量, 斎藤英夫, 中村直司: 金属学会誌, **36**(1972), 1040; Trans. JIM, **15**(1974), 139.