内部酸化した Ag-Be 合金の接触抵抗*

木 全 秀 視** 西 成 基***

Hidemi Kimata and Seiki Nishi : Effects of Internal Oxidation on Contact Resistance of Ag-Be Alloys. Silver alloys containing 0.10, 0.20, 0.45 and 0.56 wt% Be were heated at 820°C in $\sim 10^{-3}$ mmHg or in still air for 2~16 hr. The contact resistance was measured at the surface as-heat treated and 0.20 mm scraped from the surface.

The results obtained were summarized as follows :

(1) Resistivity of internally oxidized samples was higher than the non-oxidized one. On oxidizing, the resistivity of Ag-0.20 wt% Be changed from 1.9×10^{-6} to $2.2 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ and that of Ag-0.45 wt% Be from 2.0×10^{-6} to $3.0 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$.

(2) In Ag-0.10~0.45 wt% Be alloys the contact resistance on the surface as-heat treated in a $\sim 10^{-3}$ mmHg atmosphere were higher than those of the heat treated specimens in still air. In Ag-0.10~0.45 wt% Be alloys the contact resistance on the surface as-heat treated in still air was almost equal to that of pure silver.

(3) Contact resistance at the position 0.2 mm below the surface was nearly equal to that of pure silver in the case of both heat treatments, except for Ag-0.45 wt% Be alloy. Contact resistance of Ag-0.45 wt% Be internally oxidized was higher than that of the non-oxidized.

(4) The relation between contact resistance and load was generally expressed by $R=K \cdot P^m$. The value of m for the position 0.2 mm below the surface was determined as about $-\frac{1}{3}$ at the loads from 50 to 1000 g.

(Received March 24, 1972)

I. 緒 言

前報⁽¹⁾において、Ag-Be 合金が適当な条件で熱処理されると、試料内部で硬さの向上があり、この原因は Be の内部酸化によることを明らかにした。また Ag-Be 合金の内部酸化処理条件と硬さの関係⁽²⁾についても検討を行なった。

内部酸化した銀合金は電気接点材料としてよい性質を示すので、実用化されている⁽³⁾。本研究では内部酸化した

Ag-Be 合金を電気接点材料として検討するために、抵抗率や接触抵抗を測定し、その結果の考察を行なった。

II. 実 験 方 法

1. 試料の作成

試料の溶解は前報⁽¹⁾と同様で、その溶湯の一部を内寸 $10 \phi \times 195$ mm の金型に鑄込んだ。冷間で 6 mm ϕ まで圧延し、600°C, 1 hr 大気中で焼鈍後、5 mm ϕ まで機械的に切削した。

試料素材は前報⁽¹⁾の試料と同一溶湯で鑄造しており、Be

** 名古屋大学大学院、現在：株式会社高岳製作所研究所 (Graduate School, Nagoya University, Nagoya. Present address : Research Laboratory, Takaoka Ltd., Aichi)

*** 名古屋大学工学部 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Nagoya)

* 1970 年 10 月本会尼崎大会に発表

(1) 木全, 西 : 金属学会誌, **35** (1971), 615.

(2) 木全, 西 : 金属学会誌, **35** (1971), 623.

(3) たとえば H. Spengler : Metall, **10** (1956), 628.

wt% は 0.10, 0.20, 0.45 および 0.56 の 4 種類である。

重量および抵抗率測定に用いた試料は $5\phi \times 120$ mm である。接触抵抗測定に用いた試料は熱処理のままの表面の $5\phi \times 30$ mm と同一試料から切削した $4.6\phi \times 30$ mm の 2 種類である。4.6 ϕ mm の試料は測定前に表面をエメリーペーパー 5/0 で研摩して用いた。

2. 熱処理方法

熱処理に用いた装置は前報⁽¹⁾と同一で、熱処理雰囲気は静止空気(特に空気の流通を行なわない。上部は密閉されているが、下部からの空気の入出は可能である)と $\sim 10^{-3}$ mm Hg の減圧雰囲気(以下減圧雰囲気という)の 2 種類である。

熱処理温度は前報⁽²⁾により 820°C とし、加熱時間は 2~16 hr とした。

3. 測定方法

断面硬さの測定は表面硬さを除き、前報⁽¹⁾⁽²⁾と同様で、5 mm ϕ の試料を用い、表面より 0.1 mm ごとに 1.6 mm まで測定した。表面硬さは 10 箇所測定し、一番高い値と低い値を除いた 8 個の算術平均をとった。

抵抗率の測定は 25~26°C で、直流電位差計を用いた。測定電流は D.C. 1.3~2.5 A で、測定距離は治具を用い、一定とした。

接触抵抗は同一処理の試料を直交させ、荷重を加え、直流を通じ、その電位降下を直流電位差計で測定した。測定はいずれも大気中、室温で行なった。用いた接触抵抗測定装置を Fig.1 に示す。荷重は 50, 250, 500 および 1000 g と変え、電流は 0.01, 0.1, 1 および 10 A とした。接触抵抗は同一条件で場所を変えて、3 回測定し、その算術平均をとった。

Fig.1 Apparatus for measurements of contact resistance

III. 実験結果

1. 加熱による重量変化

抵抗率を測定した試料と同一試料を用いて、熱処理前後の重量を測定した。測定は同一試料で、加熱時間を積算した。静止空気、820°C で加熱した試料の重量増加の 2 乗と時間の関係はある加熱時間範囲で、直線となり、内部酸化が生じていることを示している。一方減圧雰囲気中で Be を含む試料の重量変化は 16 hr 後も ± 0.1 mg/g 以内であった。

2. 硬 さ

重量変化により内部酸化が生じており、試料の内部で、

Fig.2 Hardness distribution of Ag-0.20 wt% Be at cross section in various heat treatments

硬さの上昇が予想される。圧延のままおよび熱処理後の 5 ϕ の断面硬さは前報⁽¹⁾の板状試料とほぼ同一傾向のため、一例として Ag-0.20 wt% Be の断面硬さを Fig.2 に示す。Fig.2 より、Ag-0.20 wt% Be は静止空気、820°C、4 hr で表面より 0.30 mm 以上内部酸化し、硬さが上昇している。減圧雰囲気中で処理した試料の断面硬さは圧延のままより低下している。

3. 抵抗率

820°C、静止空気中で内部酸化した試料の抵抗率を Fig.3 (a) に示す。0.10 wt% Be の抵抗率は圧延のままで、他の試料より高い値を示した。その抵抗率は加熱時間の増加とともに低下した。0.20~0.56 wt% Be の圧延状態の抵抗率は Be wt% の増加とともに、増大した。またその抵抗率は加熱時間の増加とともに増大し、とくに 0.56 wt% Be で著しい増大を示した。純銀の抵抗率は加熱時間の増加によりほとんど変らなかった。

820°C、減圧雰囲気中で熱処理した試料の抵抗率を Fig.3 (b) に示した。全試料とも 2 hr の加熱で、抵抗率はやや低下し、その後の加熱により微増するけれども、圧延状態の値を越えなかった。Fig.3 (a) と (b) を比較することにより、

Fig.3 Influences of atmosphere and heating period at 820°C heat treatment on resistivity

Fig. 3 (a) に示す抵抗変化は主として熱処理雰囲気の影響すなわち内部酸化の影響と考えられる。

4. 熱処理表面の接触抵抗

熱処理したままの試料表面で接触抵抗を測定した。接触抵抗におよぼす熱処理の影響を明らかにするために、同一成分に対して熱処理条件を因子として実験結果を示した。

接触抵抗と荷重の関係を Fig. 4 (a) と (b) に示す。0.10 と 0.45 wt% Be の接触抵抗は 0.20 wt% Be のそれと同様の傾向であったので、0.20 wt% Be の測定結果のみを示す。

Fig. 4 (a) は純銀の圧延状態と熱処理したままの表面で測定した接触抵抗を示す。熱処理した試料の接触抵抗はいずれも圧延状態より低い値を示した。この接触抵抗は荷重依存性が小さい。

Fig. 4 (b) は Ag-0.20 wt% Be の熱処理表面で測定した接触抵抗を示す。静止空气中で熱処理した接触抵抗は圧延のままと同等かそれより小さい値となった。一方減圧雰囲気中で熱処理した接触抵抗は圧延のままより著しく増大し、4 hr より 16 hr の方が高い値を示した。

接触抵抗と測定電流の関係を Fig. 5 (a) と (b) に示す。Fig. 5 (a) は純銀の場合を示す。圧延のままの接触抵抗は測定電流の増加とともに低下し、1 A と 10 A では同一の値となった。熱処理した試料の接触抵抗は測定電流により変化せず、ほぼ一定の値を示している。

Fig. 4 Relation between contact resistance and contact load (as heat-treated, D.C. 1A)

Fig. 5 Influence of the current on contact resistance (as heat-treated, load 1kg)

0.10~0.45 wt% Be の接触抵抗と測定電流の関係は同様の傾向であったので、0.20 wt% Be の結果のみを示す。

Fig. 5 (b) は 0.20 wt% Be の接触抵抗と測定電流の関係を示す。圧延のままおよび静止空气中で熱処理した試料の接触抵抗は測定電流によりほとんど変化していない。一方減圧雰囲気中で熱処理した試料の接触抵抗は測定電流により大きく変化している。

0.56 wt% Be の接触抵抗は測定電流によりほとんど変化しなかった。

接触抵抗におよぼす Be 含有量の影響を Fig. 6 に示す。純銀から 0.45 wt% Be の圧延のままと静止空气中で熱処理した試料の接触抵抗はほぼ等しく、低い値を示した。0.56 wt% Be および減圧雰囲気中で熱処理した 0.10~0.45 wt% Be の試料の接触抵抗は加熱時間により異なった、高い値を示した。

5. 0.2 mm 切削した面の接触抵抗

熱処理後そのままの表面状態で接触抵抗を測定したと同一試料を用い、表面から 0.2 mm 切削した面の接触抵抗を測定した。静止空气中で熱処理した試料の硬さは Fig. 2 に示すように、0.2 mm の深さで H_{mv} 90 以上あり、この面の接触抵抗は内部酸化状態の値と考えられる。

接触抵抗と荷重の関係を Fig. 7 (a) と (b) に示す。0.10 と 0.20 wt% Be の接触抵抗と荷重の関係はほぼ同様であっ

Fig. 6 Influence of beryllium content on contact resistance (as heat-treated, load 1kg and D.C. 1A)

Fig. 7 Relation between contact resistance and contact load (scraped 0.2 mm, D.C. 1A)

たので、0.20 wt% Be の Fig. 7 (a) のみを示す。

一般に接触抵抗と荷重の関係は (1) 式⁽⁴⁾により表わされる。

$$R = k \cdot P^m \quad (1)$$

ここに R は接触抵抗, P は荷重, k と m は常数である。

(1) 式はすべての荷重にわたって同一の k と m を示すのではなく、接触材の変形形式や接触点の数、伝導形式により変わる。

えられた値を次の手順で解析した。まず同一 Be wt% の試料について、荷重相互間と試料相互の有意性を調べ、荷重間のみに有意差を認め、試料相互間には有意差なしと認められる熱処理雰囲気を選んだ。その結果は Table 1 に示すように、有意性の記号を熱処理雰囲気の欄に記入した。つぎに試料間に有意差なしとして、回帰分析を行ない、(1) 式に従うときのみ、Table 1 の k の値に有意性を示す記号

Table 1 Relation between contact resistance R (Ω) and load P (g) at 0.2 mm depth from surface

Be (wt%)	Atmosphere of heat treatment	$R = k \cdot P^m$	
		k	m
0	**For all samples	** 1.1×10^{-3}	-0.36
0.10	**As rolled, $\sim 10^{-3}$ mmHg	** 1.3×10^{-3}	-0.30
	**Still air	** 1.1×10^{-3}	-0.30
0.20	** $\sim 10^{-3}$ mmHg	** 1.2×10^{-3}	-0.32
	**Still air	** 1.1×10^{-3}	-0.28
0.45	**As rolled, $\sim 10^{-3}$ mmHg	** 1.5×10^{-3}	-0.36
	**Still air	** 2.4×10^{-3}	-0.34
0.56	**For all samples	** 1.5×10^{-3}	-0.34

** by 1% level of significance

* by 5% level of significance

を付して、 k と m を求めた。

Table 1 より純銀と 0.56 wt% Be ではすべての試料間

に有意差なく、それぞれの k と m が求められた。内部酸化の生じた 0.10 ~ 0.45 wt% Be の試料では静止空気と減圧雰囲気に分かれた。接触抵抗と荷重の関係を示す m は減圧雰囲気と静止空気では著しい差はなく、内部酸化の方が絶対値でやや小さくなっている。

Fig. 7 (a) と (b) から分かるように、0.45 wt% Be を除いて、同一組成の試料の接触抵抗は内部酸化の有無によりほとんど変らなかった。0.45 wt% Be の接触抵抗は内部酸化により、やや高い値を示した。

接触抵抗におよぼす測定電流の影響はほとんどなかった。接触抵抗におよぼす Be 量の影響を Fig. 8 に示す。0.45 wt% Be の静止空気を除いて、純銀から 0.56 wt% Be にわたりほとんど変わらない値を示した。

Fig. 8 Influence of beryllium content on contact resistance (scraped 0.2 mm, contact load 1kg)

(4) J.F. Archard: J. Appl. Phys., 24 (1953), 981.

IV. 考 察

1. 抵 抗 率

圧延状態で Ag-0.10 wt% Be の抵抗率は純銀や他の Be 含有試料に比して高い値となった。

Ag-0.10 wt% Be の成分は前報⁽¹⁾に示すように、Si 含有量が他に比してやや高く、0.007 wt% Si (0.027 at% Si) であった。Ag の抵抗率におよぼす Si の影響について、直接の文献はみあたらないが、1 at% あたり $4.2 \sim 5.5 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ の増加⁽⁵⁾と推定される。よって 0.027 at% Si で約 $0.15 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ の増加となり、したがって Ag-0.10 wt% Be の高い抵抗率は Si の含有のみによるものでないと考えられる。

Photo. 1 に 0.10 と 0.20 wt% Be の鋳造状態の顕微鏡組織を示す。Photo. 1 (a) の 0.10 wt% Be でも Photo. 1 (b) の 0.20 wt% Be でも結晶粒界に黒色相が認められる。この黒色相は結晶粒を取りかこみ、圧延後も存在するので、もしこの黒色相の抵抗率が高ければ、全体の抵抗率に大きく影響するものと思われる。

0.20 wt% 以上 Be を含有する試料の鋳造時の冷却はかなり速いが、0.10 wt% Be の脱ガスが不十分のため、鋳造時の冷却は金型を加熱してかなり遅くした。

Ag-5.8 wt% Be の X 線回折および X 線マイクロアナ

Photo. 1 Microstructures in the cast state
(a) Ag-0.10 wt% Be, (b) Ag-0.20 wt% Be

イザーの試験結果によると、急冷すると Ag-Be 系の δ 相を生じ、組成は 81~82 wt% Ag となる。徐冷すると δ 相は認められず、 δ 相より Be 濃度の高い相を生ずる。0.45 wt% Be の X 線回折でも δ 相が認められる⁽¹⁾ことから、同様の考えが適用される仮定すると、凝固時の冷却速度の相違により、0.10 wt% Be の黒色相は 0.20 wt% Be の黒色相より Be 濃度が高くなり、試料全体の抵抗率の上昇に大きく寄与したものと考えられる。粒界に存在する黒色相中の Be が内部酸化により BeO となり、黒色相の Be 濃度は低下し、全体の抵抗率を大きく低下させたものと考えられる。

Fig. 3 (a) の抵抗率は酸化帯と未酸化帯に区分されていない。Fig. 2 に示すような断面硬さの値から酸化帯の幅を求め、未酸化帯の抵抗率は Fig. 3 (b) の減圧雰囲気の値を用い、酸化帯の抵抗率を求めた。その結果は Table 2 に示すごとくで、内部酸化帯の抵抗率は未酸化帯に比して高い値を示した。

Table 2 Resistivity of internally oxidizing and annealing sample for Ag-Be alloys

Be (wt%)	Heating period (hr)	Resistivity ($\Omega\text{-cm}$) at 25°C	
		Internally oxidizing	Annealing
0.20	4	2.3×10^{-6}	1.9×10^{-6}
	16	2.1×10^{-6}	1.9×10^{-6}
0.45	4	3.0×10^{-6}	2.0×10^{-6}
	16	3.1×10^{-6}	2.0×10^{-6}

Meijering ら⁽⁶⁾ は Ag-0.15 wt% Be を 800°C で内部酸化し、その試料の抵抗率は酸化しない雰囲気中で焼鈍したものに比して 23% 増大したと述べている。一方 Spengler⁽⁷⁾ は Ag-0.11 wt% Be を 800°C、空気中で加熱した。内部酸化した抵抗率は $1.78 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ より $1.71 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ に低下したと述べている。これら測定値の相違は試料の作成方法や不純物の影響によるものと考えられる。

0.56 wt% Be の酸化帯の幅はかなり薄く、求められなかったため、抵抗率を酸化帯と未酸化帯に分けられなかった。しかし加熱時間の増加とともに全体の抵抗率が著しく高くなったことから、0.56 wt% Be の酸化帯の抵抗率はかなり高い値を示すものと思われる。

2. 熱処理表面の接触抵抗

Fig. 6 に示すように、熱処理したままの接触抵抗は減圧雰囲気と静止空気と異なった挙動を示し、減圧雰囲気の接触抵抗は静止空気のそれより高い値を示している。この相違について考察する。

(6) J.L. Meijering and M. J. Druyvesteyn : Philips Res. Rep., **2** (1947), 260.

(7) H. Spengler : Metall, **17** (1963), 710.

(5) F. Pawlek und K. Reichel : Metall, **12** (1958), 1.

丸棒を直交した場合の接触抵抗は(2)式⁽⁸⁾で示される。

$$R = R_m + R_f + R_c \quad (2)$$

ここに R は接触抵抗, R_m は接触金属自体の抵抗, R_f は表面層の抵抗(表皮抵抗), R_c は集中抵抗である。この場合 R_m は銀合金であるから, 他の 2 項に比して無視しうる。

(2)式は半径 a の円接触とすれば(3)式⁽⁹⁾となる。

$$R = R_f + R_c = \frac{\sigma \delta}{\pi a^2} + \frac{\rho}{2a} \quad (3)$$

ここに σ は皮膜の抵抗率, δ は皮膜の厚さ, ρ は接触金属自体の抵抗率である。

Fig. 6 より, 純銀の接触抵抗は熱処理雰囲気による差はなく, この結果から, Ag にその原因があるのでなく他にそれを求めねばならない。(3)式で接触抵抗は集中抵抗と表皮抵抗の和で示されている。集中抵抗の項は抵抗率により変わるが, Fig. 3 から減圧雰囲気中で処理した試料の抵抗率は静止空気のものより低く, 抵抗率の差によるとは考えられない。減圧雰囲気中で処理した試料の a は静止空気処理のそれに比して大きいと考えられる。以上により表面被膜について検討せねばならない。

表面の数原子層の定性元素分析を行なう方法として, オージェ電子分光法⁽¹⁰⁾が開発された。本実験ではオージェ電子分析に低速電子回折装置 EDL-5 (日本真空製)⁽¹¹⁾を用い, Ag-0.20 wt% Be の表面元素分析を行なった。試料は圧延のままおよび 820°C, 2 hr, 静止空気と減圧雰囲気の 3 種類である。その結果を Fig. 9 に示す。圧延のままおよび 820°C, 2 hr, 静止空気処理のオージェスペクトルは S, Cl, C, Ag および O が認められる。C は表面に吸着した有機物と考えられる。S および Cl は空気中にある微量の S および Cl の単体および化合物と Ag の反応

により, Ag_2S や AgCl を生成しているものと考えられる。一方 820°C, 2 hr 減圧雰囲気の試料のオージェスペクトルは Ag はなく, Be のピークが認められる。また O のピークも Fig. 9 (a), (b) に比して大きいことから, Be は BeO の形で試料表面に存在するものと考えられる。

減圧雰囲気中で 820°C に加熱すると, 純銀は重量減少があり, Be を含むものはほとんど重量変化しなかった。820°C における Ag の蒸気圧は約 1×10^{-4} mm Hg であり, Be は約 1×10^{-6} mm Hg⁽¹²⁾ である。Raoult の法則が適用されるとして, それぞれの分圧を求める。Ag-0.20 wt% Be の Ag の分圧は純銀とほとんど変わらず約 1×10^{-4} mm Hg で, Be の分圧は約 2×10^{-8} mm Hg となる。この蒸気圧の差により, 表面の銀は蒸発し, Be が表面に残ることと, 試料内部から表面へ Be の拡散により, 表面で Be が酸化し, BeO 被膜は Ag の蒸発を抑制して, 見かけの重量変化を小さくするものと考えられる。820°C, $\sim 10^{-3}$ mm Hg における BeO の蒸発は小さく⁽¹³⁾, 無視しうる。

宮田ら⁽¹⁴⁾は銀合金の耐変色性を向上させるため, Ag-0.20 wt% Be を 0.5 mm Hg で 500°C, 10 min 間加熱し, 好結果をえた。しかし空気中の加熱は改悪となる。この原因は減圧下で比較的高い純度の高い, 電気伝導性の低い BeO 被膜が生成されることを述べている。

BeO 被膜は純粋であると, 抵抗率が高く⁽¹⁵⁾, Be と BeO の容積の比は約 1.6⁽¹⁶⁾ となり, その被膜は緻密であると考えられる。Photo. 2 は接触抵抗を測定した試料表面で, Photo. 2 (b) は部分的に被膜の形成が見られる。

これから Fig. 6 に示す減圧雰囲気の接触抵抗の増大は BeO 被膜の形成によると考えられる。

減圧雰囲気中で熱処理を行なっても, 内部酸化は起らず, 硬さの向上は望めないもので, 減圧雰囲気での BeO 被膜の生成は実用上問題とならない。

3. 0.2 mm 切削した面の接触抵抗

内部酸化を行なった合金と行なわない合金の接触抵抗は Fig. 8 に示すように, 0.45 wt% Be を除いて大きな相違はない。それぞれの接触抵抗の荷重依存性は Table 1 に示すように, m は約 $\frac{1}{2}$ となった。この m の値について考察する。

0.2 mm 切削した面の接触抵抗は機械的に切削後, エメリーパーで研摩しており, 表面被膜の影響は小さいので, 測定された接触抵抗はほとんど集中抵抗によるものと見なされる。したがって半径 a の円接触とすれば, 接触抵

Fig. 9 Auger spectra of Ag-0.20 wt% Be

- (8) 佐々木, 沖野: 日本機械学会論文集(第3部), **31** (1965), 872.
- (9) R. Holm: *Electric Contacts*, Hugo Gebers Förlag, Stockholm, (1946), 10.
- (10) たとえば中山: 防蝕技術, **20** (1971), 255.
- (11) 成沢, 早川: 応用物理, **40** (1971), 616.

- (12) O. Kubaschewski and E. L. Evans: *Metallurgical Thermochemistry*, Pergamon Press, New York, (1958).
- (13) 日本学術振興会薄膜第131委員会編: 薄膜工学ハンドブック, オーム社, (1964), I-141.
- (14) 宮田, 鳥取, 岡本: 金属学会誌, **13** (1949), No. 5, 40.
- (15) 相山: 金属材料の加熱と酸化, 誠文堂新光社, (1955), 46.
- (16) 久恒, 萩原: 軽金属, **13** (1963), 351.

Photo.2 Surface microstructures of Ag-0.20 wt% Be for contact resistance
(a) as rolled, (b) as heat treated at 820°C for 16 hr in $\sim 10^{-3}$ mm Hg, (c) as heat treated at 820°C for 16 hr in still air

抗は(4)式となる。

$$R_c = \frac{\rho}{2a} \quad (4)$$

弾性変形の半径 a_E は Hertz の理論を用い⁽¹⁷⁾, 接触材は同一処理の試料であり, ポアソン比として純銀の 0.38⁽¹⁸⁾ を用いると, (5)式となる。

$$a_E = 0.86 \sqrt[3]{\frac{Pr}{E}} \quad (5)$$

ここに E は接触材のヤング率, r は接触材の半径である。一方塑性変形の半径 a_P は(6)式で表わされる。

(17) A. Keil : *Werkstoffe für elektrische Kontakte*, Springer-Verlag, (1960), 11.

(18) 谷井, 藤間 : 電気通信学会雑誌, 44 (1961), 822.

$$a_P = \sqrt{\frac{P}{\pi H}} \quad (6)$$

ここに H は硬さである。

弾性変形と塑性変形の臨界荷重は(5)式と(6)式を等しいとして, ヤング率と硬さを代入することにより得られる。熱処理した純銀の硬さは H_{mv} 42~55 で, 純銀のヤング率 7.5×10^5 kg/cm²⁽¹⁸⁾ に対して, 臨界荷重は 100~200 g となる。測定荷重は 50~1000 g であるから, 主として塑性変形となり, m は約 $-\frac{1}{2}$ となるはずである。しかし得られた純銀の m は -0.36 であるから, 主として(5)式の弾性変形を受けているのに該当する。

Ag-Be 合金のヤング率やポアソン比が不明であるが, えられた m はいずれも約 $-\frac{1}{2}$ となり, (5)式の弾性変形に該当する。

V. 結 言

0.10~0.56 wt% Be の銀合金を静止空気と減圧雰囲気で 820°C に 4~16 hr 加熱した。そのうち熱処理表面および 0.2 mm 切削した面の接触抵抗と抵抗率を測定した。えられた結果を要約すると次のようであった。

(1) 圧延のままで, Ag-0.10 wt% Be の抵抗率は他の Be 含有のそれより高い値となった。0.10 wt% Be の高い抵抗率は試料作成時の徐冷によるものと考えられる。0.20 wt% Be 以上の抵抗率は Be 含有量の増加とともに上昇した。

(2) 内部酸化した試料の抵抗率は未酸化のものに比して上昇する。0.20 wt% Be の内部酸化帯の抵抗率は約 $1.9 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ から約 $2.2 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ に増加し, 0.45 wt% Be で約 $2.0 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ から約 $3.0 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$ となった。0.56 wt% Be では内部酸化層の厚さが測定できず, 抵抗率を内部酸化帯と未酸化帯に区分できなかった。

(3) 減圧雰囲気中で熱処理した 0.10~0.45 wt% Be 試料の表面の接触抵抗は, 静止空気中で熱処理したもののそれより高い値となった。これは減圧雰囲気中で熱処理した試料の表面に BeO 被膜が形成されるためと考えられる。静止空気中で熱処理した試料の表面の接触抵抗は 0.56 wt% Be を除いて純銀のそれとほぼ同様な低い値となった。

(4) 0.2 mm 切削した試料の接触抵抗は 0.45 wt% Be を除いて, 内部酸化の有無に関係なく, ほぼ同一の値となった。内部酸化した 0.45 wt% Be の接触抵抗はやや高い値を示した。

(5) 接触抵抗と荷重の関係は一般に $R = k \cdot P^m$ で表わされる。0.2 mm 切削した Ag-Be 合金の m の値は 50~1000 g ではほぼ $-\frac{1}{2}$ となり, 弾性変形に該当する。

オージェ分析は日本真空技術株式会社成沢 忠氏および藤原準一氏の御協力をえたので厚く謝意を表します。実験結果について御検討いただいた名古屋大学工学部宮地 巖教授に深く感謝いたします。また実験遂行にあたり, 御協力と御激励いただいた株式会社高岳製作所井手定雄社長, 岩井栄一取締役に感謝いたします。