大電流用耐溶着性接触子材料

竹内 久祐* 富田 貞美*
戸田 忠俊* 大畠 耕吉*

Hisasuke Takeuchi, Sadami Tomita, Tadatoshi Toda and Koukichi Ouhata: Non-Welding Contact Materials for Heavy Current Applications. The authors observed the welding tendency of electrical contact materials by means of measuring the strength of welding which was caused at the contact by passing a large current through the stationary contact to be tested. The critical welding current of a contact material was defined as one below which no welding occurred. Further an attempt was made to find materials having a high critical welding current, other wise, materials having a small welding strength when welding cannot be avoided. The results of experiments were summarized as follows.

(1) Assuming the critical welding current of copper contact as 1, the value of Cu-Pb or Cu-Bi alloys contact was as high as 1.2 to 2.0. Thus, it was concluded that copper alloys alloyed with low melting point elements possessed an excellent non-welding tendency.

(2) Sintered silver-carbon and silver-carbon-cobalt materials showed a high critical welding current. A large value of the critical welding was obtained by use of a pair of contacts being composed of different kinds of alloys, e.g. silver and cobalt-carbon alloy.

(Received September 16, 1966)

I. 緒 言

近年、配電系統機器の単機容量の増大および車両などの制御装置の大容量化に伴なつてしや断器接触子の損傷の対策が重要視されるようになった。すなわち、開閉接触子の投入時の溶着および静止接触子においても短絡電流によつて起る溶着のため、以後のしや断器の操作が不能になる場合がありうる。このうち静止接触子材料の溶着現象を、電流値および接触力との関係において定量的に扱うことは、接点性能に関する研究項目の中では比較的容易な事柄であり、新材料を発見する糸口ともなるのでこの方面の研究を行なつた。

一般に接点材料の固有抵抗を ρ 、接点の接触面積を S ($S = \pi a^2$ で表わすときは a を接触半径と呼ぶ) とすれば、接触抵抗 R_c に関する基本式として

$$R_c = \frac{\rho}{2a}$$

が知られている。通電とともに接触部には R_c に比例したジュール熱が生じ、熱伝導率の大小に左右されるが、接触点はその材料の融点に達した時点で溶着が起ると考えるのが普通である。いま、常温において弾性限内の接触状態にある接点 (同材質、球面) の接触半径を考えると、材料の弾性係数を E 、接触力を F 、接点面の曲率を r とすれば、Hertz の一般式⁽¹⁾ から

$$a \propto \sqrt[3]{\frac{Fr}{E}}$$

が知られる。弾性限界を越えた接触状態では一般に

$$a = \sqrt{\frac{F}{\pi H}} \quad \text{ただし } H \text{ は材料の硬度}$$

与えられる。したがつて後者の場合

* 株式会社日立製作所日立研究所 (Hitachi Research Laboratory, Hitachi Ltd., Hitachi)

(1) R.Holm: Electric Contacts, (1946), 73.

$$R_c = \frac{\rho \sqrt{\pi H}}{2 \sqrt{F}}$$

となるから、 $\rho \times \sqrt{H}$ の小さな材料がジュール熱が小さいことになり、これが耐溶着性接触子材料を求める一つの目安となる。

溶着を問題にするような大電流集中がある場合には、昇温とともに接触半径の増加が塑性的に起ると思われ、 ρ の温度係数による抵抗増加にもかかわらず R_c の上昇がゆるやかになることが予想される。この接触面積拡大の傾向は接触力、曲率、材質などにより相違するが、いずれにせよ電流の増加につれて増し、やがて接触点の温度が材料の融点に達することは避けられない。

静止接触子の溶着限界電流は Cu, Ag などの周知の金属について研究されていて⁽²⁾、 R_c を左右する要因すなわち接触力、接触子面の曲率などによりかなり変化するほか、表面状態すなわちアラサや酸化膜の有無により影響されるといわれている。

溶着限界電流を推定する計算式も二、三提案されている⁽³⁾が、金属学的な見方では高温硬さを参考にするとともに、接触子形状および接触力を一定として溶着電流を実測するのが材料選択のための早道と考えられる。その場合に、溶着力(分離に要した力)を測定して、溶着力と電流との関係図を求めることが実用面で有効な資料となると思われる。以下このような溶着特性を求める方法を紹介し、これにより既知材料より耐溶着性のすぐれた接触子材を見いだすまでの経過を報告する。

II. 試験方法および試料

1. 試験方法

本研究は Fig. 1 に示す装置による溶着試験を中心として行なわれた。供試接触子は 15 R の球面と平面との組

Fig. 1 Apparatus for testing of welding characteristics of contact.

合せとし、接触力は 2.5 kg 一定とした。LC 共振回路を用い、コンデンサに充電した電荷を放電したとき、供試接点

Fig. 2 Wave form of passing current.

Table 1 Materials for test contacts and their physical properties.

Material	Composition	Conductivity (IACS%)	Vickers hardness
Cu	—	100	35~50
Ag	—	108	26~60
(Ni)*1	—	25.4	70
(Cr)*1	—	8.9	130
(Pd)*1	—	15.9	42~100
(Rh)*1	—	38.7	100~260
(Pt)*1	—	16.8	50~80
W	—	36.4	125
Mo	—	35.4	120~370
Cu-Pb (10)	Cu 90% Pb 10%	74~80	34.7~30
Cu-Pb (20)	" 80 " 20	60~70	28~33
Cu-Pb (30)	" 70 " 30	55~60	24~27
Cu-Pb (40)	" 60 " 40	49	21
Cu-Pb (50)	" 50 " 50	40	18
Cu-Bi (20)	Cu 80% Bi 20%	23~25	28
Cu-Bi (40)	" 60 " 40	12~24	23
(Pb)*2	—	8.5	9
(Bi)*2	—	1.5	4
Ag-W (70)	Ag 30% W 70%	46	93.5
Ag-W (50)	" 50 " 50	63	68
Ag-W (30)	" 70 " 30	82	55
Ag-CdO	Ag 90% CdO 10%	75.5	71.2
Ag-C (1)	Ag 99% C 1%	90.2	39
Ag-C (2)	" 98 " 2	76.7	39
Ag-C (3)	" 97 " 3	67.0	39~40
Ag-C (3) -Co (0.5)	C 3% Co 0.5% AgBal	58.3	43~44
Ag-C (3) -Co (1)	" 3 " 1 "	58.1	43~44
Ag-C (3) -Co (5)	" 3 " 5 "	57.7	44~45
Ag-C (3) -Co (10)	" 3 " 10 "	57.2	45~46
Ag-C (3) -Co (20)	" 3 " 20 "	56.4	49~50
Ag-C (3) -Ni (0.5)	C 3% Ni 0.5% AgBal	63.7	43
Ag-C (2.5) -Ni (0.5)	" 2.5 " 0.5 "	70.3	45
Ag-C (2) -Ni (0.5)	" 2 " 0.5 "	74.8	53
Ag-C (2.5) -Ni (1)	" 2.5 " 1 "	69.8	50
Ag-C (2.5) -Ni (5)	" 2.5 " 5 "	67.3	53
Ag-C (2.5) -Ni (10)	" 2.5 " 10 "	64.5	56~57
Co-C (1)	C 2.7% CoBal	12.8	135
Co-C (2)	" 2.47 " "	11.3	273
Co-C (3)	" 2.73 " "	9.7	210
Co-C (4)	" 0.54 " "	18.7	225

*1 Specimens were made by electrolytic plating with metals of () on the copper base.

*2 Insert for reference.

*3 The value of Brinell hardness number : Hb (500 kg) .

(2) 鳳：電気接点と開閉接触子，(昭 31) .

(3) 吉岡：日立評論，44 (37) , 312.

に流れる約 10 ms の半波電流 (Fig. 2 参照) を利用する方式である。充電電圧を変えることにより試験電流を 10,000 供試接触子の表面はすべて▽▽▽の仕上状態で試験した。

Table 2 Comparison of the critical current according to the various couples of contact materials. The examination was performed under the contact force 2.5 kg with apparatus as shown in Fig.1. The values in the table show the ratio of critical current of the material to that of Cu: Cu contact.

Flat contact	Spherical contact	Cu	Ag	Cu-Pb (10)	Cu-Pb (20)	Cu-Pb (30)	Cu-Pb (40)	Cu-Pb (50)	Rh plated Cu	Ag plated Cu	Ni plated Cu
Cu	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ag	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
Cu-Pb (10)	1.3	—	—	1.4	—	—	—	—	—	—	—
Cu-Pb (20)	1.5	1.16~1.25	—	1.5	—	—	—	—	1.4	1.16~1.25	—
Cu-Pb (30)	1.65	—	—	—	1.6	—	—	—	—	—	—
Cu-Pb (40)	1.7	—	—	—	—	1.7	—	—	—	—	—
Cu-Pb (50)	1.8	—	—	—	—	—	1.74	—	—	—	—
Cu-Pb (20) (Ag plated)	—	—	—	—	—	—	—	—	1.1	—	—
Ag-W (30)	1.25	1.25~1.33	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ag-W (50)	—	0.92~1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ag-W (70)	12.5	0.92~1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
W	0.7	1.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mo	0.7	1.45~1.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cu-Bi (20)	1.74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Cu-Bi (40)	1.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ag plated Cu	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Rh plated Cu	1.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ni plated Cu	—	0.74	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Ag-CdO	0.8	0.97	—	—	—	—	—	—	—	—	0.74

Ap (Apは電流のピーク値) まで与えることができる。通電の結果溶着した接触子は Fig.1 (b) のようにばねの圧縮を利用して開離させ、そのときの開離力を読むことができる。

耐溶着性の判定とともに実用上重要なことは通電容量、温度上昇の問題であるが、本報告では省略し、選抜された耐溶着性接触子について接触抵抗値を実測比較するにとどめる。

2. 試料作製の方針

溶着の生じにくい接触子材料を探究するため

- (i) 溶着限界電流が高いこと。
- (ii) 溶着しても溶着力が大きくなること。

の二つのねらいが考えられる。(i)のためには、熱伝導率の大きい材料、固有抵抗が小さい材料、融点が高い材料が好都合であり、すでに Ag, Cu ならびに W, C などを含む材料が検討されてきた⁽¹⁾。しかし一定圧力に対して接触面積の大きな材料あるいは昇温時の接触面積拡大率の大きな材料はあまり調べられていない。そこで Ag または Cu よ

Fig.3 Effects of passing current on the welding strength of Cu-Pb contacts.

Fig.4 Effects of passing current on the welding strength of Cu-Bi contacts.

り融点が高くなくても高温硬さの低い金属に注目する価値があると考えた。

つぎに (ii) の考え方は従来の実験式には考慮されていない冶金学的な観点に立つものである。すなわち、(a) 異種金属を組合せて接触子とし、一方の金属が溶融した場合どのくらいの付着力となるかを見る。(b) Cu や Ag の良伝導性を活かし表面だけ高融点物質をもつて被覆する。(c) 硬さの低い物質または脆い物質をもつて接触子を構成し、たとえ溶着が起つても凝固生成物が容易に引き裂かれるような材質を探す。などの方法がある。この (c) の見方をさらに掘り下げれば Pb, Bi, Sn, In などの低融点金属が考えられる。それらの金属自体は固有抵抗が大きいので、Cu や Ag を主成分としそれらを添加した複合組織体が有望視され、粉末冶金による製作も考えられる⁽⁴⁾。その意味では固溶体を作らない Cu-Pb あるいは Cu-Bi 合金が好適であろう。

このほか、鋳鉄のような黒鉛の存在のため機械的強度の低い合金あるいは金属間化合物を接触子とする着想もある。

以上のような方針にそつて準備した接触子試料 38 種の物理的性質を Table 1 に、実験に供した組合せを Table 2 に結果とともに記した。試料の製法については別報にゆずる。

III. 実験結果

1. 溶着特性試験 (その1)

本研究で材料の比較のため、溶着力が接触力と同じ 2.5 kg になるような電流値をグラフ上に求めてこれを溶着電流と呼んだ。Fig. 3 がそのグラフの一例で、Cu 対 Cu の組合せによる溶着電流は本実験条件では 5000 Ap である。これを 1 として供試接触子の溶着電流を求め、結論的に比較表示したものが Table 2 である。

本表からわかるように、Cu-Pb 合金同志または Cu 対 Cu-Pb 合金の組合せは溶着電流が大きく、とくに Pb 含有量が大きいほど大であるが、Pb 含有量が 30% を越すと飽和してくる。Cu-Bi 合金も同様な傾向が認められた。Ag-W 系統のも

Fig. 5 Welding characteristics of pairs of contacts composed of high melting point metal and low melting point metal.

(a) Current: 6560 Ap; Contact area: about 1.07 mm²; Not welded. The exuded Pb is little.

(b) Current: 7450 Ap; Contact area: about 1.33 mm²; Not welded. The exuded Pb increases gradually.

(c) Current: 8340 Ap; Contact area: about 1.64 mm²; Not welded. The exuded Pb is much.

Photo.1 The contact mark of Cu: Cu-Pb contactor.
Left: Cu-Pb with flat surface.
Right: Cu with spherical surface.

(4) H. Schreiner: *Pulver metallurgie Elektrischer Kontakte* (1964), 141.

のはさほど大きい溶着電流を示さず、W 対 Ag あるいは Mo 対 Ag という組み合わせが注目される例であつた。

Fig.3(a) (b) に示した Cu-Pb 合金、Fig.4 に示した Cu-Bi 合金の溶着特性曲線には、純金属接触子には見られない特徴がある。それは、たとえば Cu 対 Cu-Pb 合金の場合、溶着開始電流は 3,500~5,000 Ap 付近であつて Cu 対 Cu と比べ大差がないが、急には曲線が立上らず溶着力 0.5 kg 以下のところで横ばいになる傾向のあることである。すなわち開離力を 1 kg ぐらいに設定しておけば“溶着せず”と判定されるような軽い付着状態が続いていることを表わす。Cu-Pb 合金同志をつき合わせに場合も同様な特性を示した。Cu-Bi 合金の場合は溶着電流が一層大きめになつている。

つぎに Ag 対 W、Ag 対 Mo の組み合わせの溶着特性を Fig.5 に図示した。Cu 対 W、Cu 対 Mo は Cu 対 Cu の接触子より逆に溶着しやすいことが知られた。

2. Cu-Pb 合金の溶着痕の観察

通電電流を増加させたときの接触状態と痕跡を調べたが、代表的な表面写真を示すと Photo.1 のようである。Cu 対 Cu-Pb の溶着電流付近から、表面に薄く Pb が浸み出した形になつているが溶着力はほとんど零である。これには、Cu と Pb が互いに溶解せず、かつ溶融 Pb の純 Cu 面に対する濡れの悪い性質が（フラックスを使用しないハンダ付のごとく）有効に働いていると考えられる。なお本実験では、通電中に接触抵抗が激減する特異な現象が認められた⁽⁵⁾。

3. 接触抵抗測定

Table 1 に挙げた供試材の組み合わせについて接触抵抗 R_c を測定し、溶着電流値と対比しつつ図示したものが Fig.6 である。接触抵抗は測定時の電流や接触力により変るが、ここでは D.C. 700 A 通電時の電圧降下から求め、接触力 10, 30 および 50 kg について示してある。これによると、考案した供試接触子はいずれも室温での R_c が Ag または Cu 接触子より大きく、Cu 対 Cu の場合を 1 とすると Cu 対 Cu-Pb が 1.2~2, Cu 対 Cu-Bi が 4~15, Ag 対 W は 6~8 という高い値を示した。それにもかかわらず溶着電流が Cu 対 Cu より大きいことは金属学的に特異な性質があずかっているものと想像される。

4. 溶着特性試験 (その2)

Table 1 に記した Ag 系接触子について溶着試験を行なつた。焼結 Ag-C 材の溶着特性を Fig.7 に示す。これによると純 Ag 接触子より Ag-C の方がやや優れ、C の添加とともに溶着力が低くなるが C 1~3% が適当な範囲と思われる。というのは、C が多いほど図の点線が示すように、大電流による材料の気化蒸発が起り不安定な接触になるからである。回路条件は前と同じなので Cu-Pb や Cu-Bi 合

金にくらべ溶着開始電流値はやや低いことになる。

つぎに Ag-2.5% C に Ni を添加した焼結材料⁽⁶⁾ を作製

Fig.6 Comparison of contact resistance and critical welding current.

● welding limit current

—●— contact resistance at contact force 10 kg

—x— contact resistance at contact force 30 kg

—○— contact resistance at contact force 50 kg

Fig.7 Welding strength affected by C-content on the sintered Ag-C alloys.

し試験した。その結果は Fig.8 のとおりで、Ni の添加は溶着電流がやや低くなり溶着力が大きくなるので、とくに効果はないことがわかつた。

Ag-3% C に対し Co を加えた焼結材については Fig.9 の結果を得た。これによれば Ag-3% C に対する 0.5~10% Co の添加が耐溶着性を改善する効果をもち、Co を 20% も

(5) 吉岡、竹内：昭和38年電気学会東京支部大会講演、No.194。

(6) Adil and Westhoff: ETZ, 85(1964), 231.

加えると溶着しやすくなることがわかる。

さらに溶製の Co-C 合金を作り、これと Ag とを組合わ

Fig. 8 Welding strength affected by C and Ni content on the sintered Ag-C-Ni alloys.

Fig. 9 Welding strength affected by C and Co content on the sintered Ag-C-Co alloys.

Fig. 10 Welding characteristics of the contacts composed of Ag and Co-C alloys.

せた接触子を試験した。供試 Co-C 合金には、C 0% のほかに 0.5% および 2.5~2.7% の 4 種類があるが Fig. 10 が示すように、溶着特性が Table 1 の試料中きわめて異色あるものであった。たとえば Co-C の共晶組成に近い No. 1, No. 2 および No. 3 の試料を Ag と組合わせたとき、Ag 対 Ag 接触子の 2 倍以上の溶着限界電流を示した。Cu 対

Cu-Pb 合金の接触子と比較してもさらに優れている。しかし特性曲線の立上り方が Cu 対 Cu-Pb のように緩徐ではなく、溶着が起る電流では急に溶着力が増す傾向があることは注意しなければならない。

IV. 考 察

1. Cu-Pb 合金の溶着試験における特異現象

通常の測定法で測った Cu-Pb および Cu-Bi 合金の室温の接触抵抗が Cu 対 Cu の場合に比して大きいにもかかわらず溶着し難いという現象に注目しさらに観察を進めた。Cu-Pb 合金を用いた接触子について試験電流波形および接触子端子電圧波形をオシログラムに撮ると、Fig. 11 に

Fig. 11 Examples of oscillogram which show the relation of contact voltage and passing current on Cu-Pb (20) contacts.

みられるように電圧 (U) の上昇が頭打ちとなっている。通電電流が大きいと端子電圧が急に増加した上明瞭な溶着を起す。これらの変化を接触抵抗: 端子電圧の関係で示すと Fig. 12 のようになるが、図の曲線 (1), (2) が右下りの部分を示すことは Cu-Pb (Cu-Bi) 特有の現象であつて、Cu 対 Cu 接触子について同図に示した点線 (3) が普通の材料の R-U 特性なのである。すなわち (1), (2) は組織内の Pb が溶融した後材料の軟化が起り、接触面積の拡大に伴ない接触抵抗が減少したものと説明できる。端子電圧 0.3V 付近での接触抵抗は、接触力 2.5 kg の場合 Cu 対 Cu が 46~55 $\mu\Omega$, Ag 対 Ag が約 50 $\mu\Omega$ であるのに比べ、Cu 対 CuPb は 40~50 $\mu\Omega$ と下まわつた値になつていた。溶着痕は Cu-Pb

の場合かなり大きくなつており、顕微鏡でみると Photo.1 のように浸み出した Pb の薄い層が生じていることから、

Fig. 12 Peculiar phenomenon occurred in Cu-Pb alloy contacts.

300°~400°C 付近での接触部の塑性変形の経過が大体想像できる。要するに、室温における接触抵抗が Cu 対 Cu の数倍でありながら高温ではかえつて低くなっていることが判り、かくして Cu-Pb 合金の溶着電流が大きいことの一因が推定できた。

しかしさらに、「溶着しても溶着力が小さい材料」である理由としては、Cu-Pb 合金自体の機械的強度が小さいことが挙げられる。すなわち 鋳造 Cu-Pb 合金の引張強さは Pb 10~30% の範囲では大体 5~8 kg/mm² である。したがつて浸み出した Pb でハンダで付けされたような状態の溶着力はもちろん小さく、Cu の相が溶融するような試験条件においても溶着部を開離さすに要する力が小さいことが予想される。

2. 投入溶着に対する検討

静止接触子として好適な材料が選定された場合、これが開閉接触子として使用できるか否かは非常に複雑な問題と

なる。まず溶着については投入時におこる躍動および先行アークのため静止接触時より比較的小さい電流で溶着が起る傾向がある。そして空気中では酸化の影響を無視できない。そのほかアークによる消耗を考えると低融点金属を含有する接触子材料は一般に気中開閉用としては不都合なことが多い。

しかし溶着のみを問題とし、かつ酸化の起りにくい雰囲気であれば、著者らはつぎのように考えている。すなわち静止接触子の溶着特性の曲線の形が Cu-Pb 合金のような横ばい型であれば投入溶着の場合にも小電流側へグラフが移行するだけで「溶着しても溶着力が小さい」という性質は保持されるであろう。もちろんばらつきは大きく溶着特性曲線は広い幅になることはやむを得ないであろう。

V. 結 言

主として接触子の閉成静止状態における溶着現象を定量的に扱い、材料組成を広範囲に変え耐溶着性を比較した。結果を要約すると

(1) Pb あるいは Bi を含む Cu 系材料は、大電流通電による溶着に耐える特長を有し、たとえば断路器やラインスイッチに有効な静止接触子を提供することができる。

(2) 融点の差がかなりある異種金属の組合わせでは Ag 対 W (Mo) あるいは Ag 対 Co-C 合金が耐溶着性が大きい。

(3) 焼結 Ag-C 系材料も純 Ag よりすぐれ、これに Co を添加すればさらに耐溶着性が向上する。

本研究は、溶接のような強度の高い接合部を得ようとする通常の材料研究とは逆のねらいをもつもので、実験の手法としても新しいと思われる。

研究の遂行にあたり御助言をいただいた日立研究所高砂常義氏ならびに吉岡芳夫氏に深謝の意を表する。