

導線放電爆発による金属の溶射：第1報

栖原，寿郎

福田，重久

伊藤，普

<https://doi.org/10.15017/4743443>

出版情報：應用力學研究所所報. 27, pp.55-64, 1967. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



導線放電爆発による金属の溶射 (第 1 報)

栖 原 寿 郎*
福 田 重 久*
伊 藤 普**

1. 緒 言

工業技術革新にともなつて、ますます苛酷な使用条件に耐え得る材料が要求されるようになり、超耐熱材料、高強度材料など新材料の開発も急速にすすめられて来ている。一方、実際の構造物、あるいは機械部品などの耐熱性、耐食性、耐摩耗性などを飛躍的に増大するために、これらの材質を変えずにその表面処理を施すことによつて問題を解決する方法も開発されている。その一つが本論文で述べる溶射コーティングである。これは金属や非金属などの表面を高溶融点物質、あるいは硬質合金などの薄い層によつて被覆し高度の耐熱性や耐摩耗性などを付与しようとするものである。従来行なわれている溶射方法には、アセチレンなどのガスの爆発を利用して被覆材料の線、または粉末を溶融し、この溶融体を爆発ガスによつて噴出させ、金属表面に溶射する方法や、また、プラズマジェットを利用して溶射する方法などがある。本論文は溶射金属導線の放電爆発を利用した溶射コーティングについて実験的研究を行なつて、その可能性を確めたものである。すなわち、ここで述べる方法は、金属導線(溶射材)に衝撃大電流を放電することによつて溶融と爆発を行なわせ、その際に発生する溶射金属の高温ガスと溶融金属粒子を大気中または不活性ガス中で秒速数百米以上の高速で鍍金すべき材料の表面に衝突せしめ、この爆発ガスの雰囲気中で溶射コーティングを行なう方法である。この方法で溶射コーティングされた層は、酸化がほとんどなく、表面粗さが約 5μ 程度で極めて平滑であり、組織も見掛け比重が 90% 以上の緻密さを示した。さらに層の接着強度も他の方法によるものに比べて強く、エポキシ接着剤による剝離試験ではエポキシ材内から破断した。特にこの方法の最も大きな特徴は放電条件および導線寸法の精密な制御が可能であることから溶射層の厚さ、組織などの精度が他の方法に比べてはるかに高いことである。第 2 章は溶射装置の説明であり、第 3 章では溶射に最適な放電条件と導線寸法の決定を行なつた。また第 4 章は導線と母材の相対位置と溶射効果について論じ、第 5 章は溶射層の精度、組織、強度について述べた。第 6 章は結論である。

2. 実 験 装 置

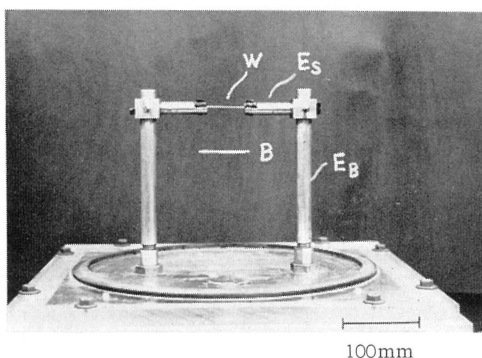
2・1 放電装置¹⁾ 溶射材である導線を爆発させるための放電回路の主要目は、コンデンサ容量が最大 200 μ F、充電電圧最大 30 kV、したがつて充電エネルギーは最大 90 k joule である。ただし、実験時

* 九州大学応用力学研究所

** 日本タングステン株式会社

には必要に応じてコンデンサ容量を加減した。なお回路の固有振動数は約 22 kc である。

2・2 溶射装置 放電回路の出力（ケーブル）端に接続される溶射装置は第 1 図に示すように絶縁体に固定された電極棒（ E_B ）と、それに附属した可動極（ E_S ）とからなり、溶射線（導線 W ）は可動極の先端に架線される。また、母材はその導線から適当な距離に、しかも爆風で飛ばされないように固定される。さらにまた、表面の酸化防止のために導線および母材間に不活性ガスを充満させておくこともある。



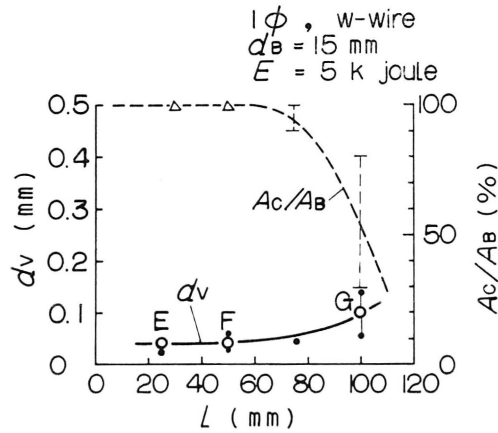
第 1 図 導線放電法による金属の溶射コーティング装置

W : 溶射導線 E_S : 可動極 E_B : 固定電極 B : 母材

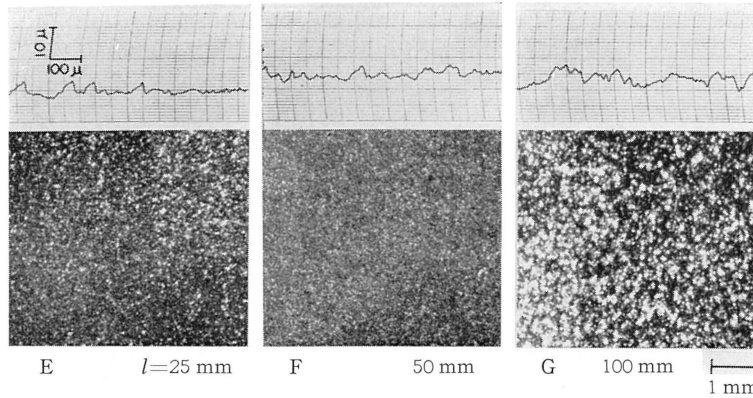
3. 放電条件と導線寸法

3・1 導線雰囲気 一般に、ガス中で導線放電を行なう際は導線の雰囲気電離度の電離度や、気圧などが、放電現象に大きく影響してくる。例えば、アルゴンガス中で導線放電を行なう場合は、アルゴンが電離され易く、火花電圧も低いので放電電流が導線周囲のアルゴン中にも多く流れる。したがって、空気中や窒素ガス中放電の場合とは放電条件が大きく変わってくる。また、ガス圧が低くなっても同様のことが生ずる。しかし、ここでは空気、窒素ガスのいずれも 1 気圧中での導線放電を行なった場合について述べる。

3・2 導線寸法の決定 金属導線は放電衝撃大電流によって、まづ溶融し、さらに super heat されて遂にその一部が爆発的に気化して溶融金属粒子を飛散させる⁶⁾⁷⁾⁸⁾。最良の溶射層を得るためにはこの飛散する粒子の質量、速度、温度が最も適当なものでなくてはならない。これらは放電条件、すなわち、充電電圧、充電エネルギー、回路の固有振動数、さらに導線の断面積、長さ、材質によって支配される。これらの要素の最適値を求めるための多数の実験結果のうち、まづ、導線長さ (l) と、溶射面の粒度 (d_v) との関係についての一例を第 2 図と第 3 図の写真に示す。第 3 図からもわかるように最適線長よりも線長が短か過ぎると溶射むらの多い局所的な層となり、また、線長が長過ぎると導線のエネルギー密度が不足して、粒度 d_v が粗くなり、溶射むらができて、接着度も低い。次に、爆発導線 (W -wire) の径および長さを一定として充電エネルギーと溶射表面粒度 (d_{v0}) との関係求めた結果が第 4 図、



第2図 導線長さ l に対する溶射層表面粒径 d_v , および溶射層 A_c と母材露出面 A_b との面積比 A_c/A_b との関係



第3図 第2図 EFG の溶射面と面粗さ(上)

E : むらがあり局所的

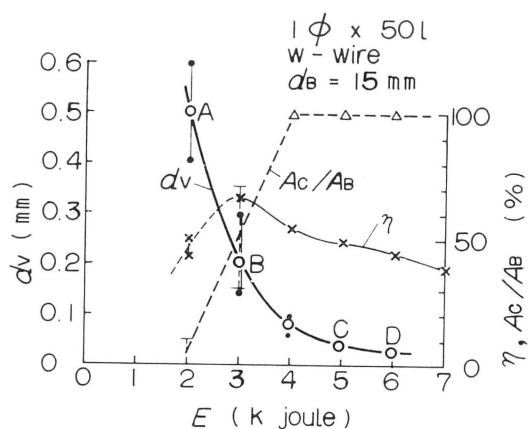
F : 最適

G : むらが多くて少し粗い

第5図である。さらに、爆発時の写真を第6図に示す。これらからもわかるように、充電エネルギー量に対して線径が大き過ぎるときは導線中に供給されるエネルギー密度が不足するので、爆発時に飛散する粒子の速度と温度が低く、溶射面は粗く不均一となる。

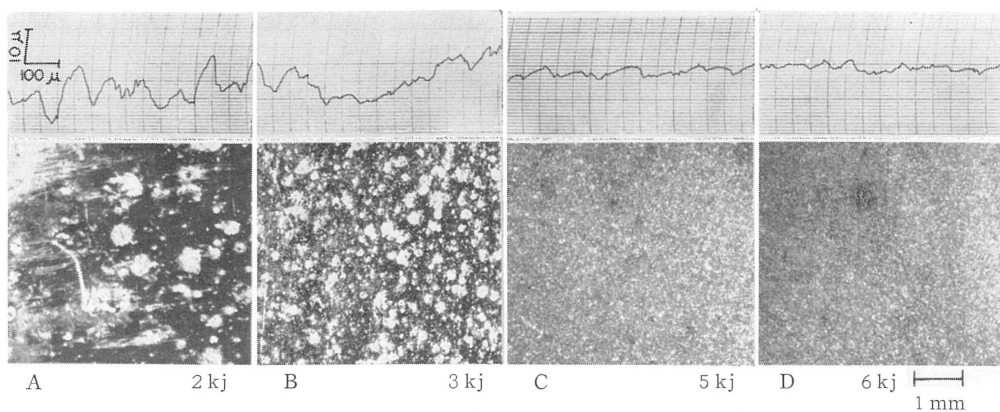
これに比し、線径が最適な場合は、爆発で飛散する粒子の質量 m_v と、速度 V_v および温度 T_v が溶射層形成に適当な場合であつて、このときの溶射面は均一で接着度も大きく、密度の高い良好な溶射層が得られる。

さらに、線径が細すぎる場合は、線中のエネルギー密度が大きいために、線の殆んどがガス化され、粒子の質量も小さなものとなるので、溶射面は粒度が小さく、導線と直交方向に数 mm 間隔の縞模様のむらを生じ、接着度も小さい。また、ガスとなつて散逸する量が多く、回収効率が悪い。以上の実験を行なつた結果、最良の溶射層を得る導線断面積と線長は次の (1), (2) 式で与えられた。



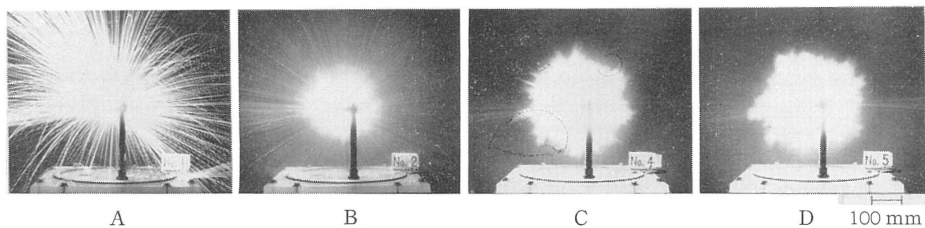
第4図 充電エネルギー E に対する、溶射層表面の粒径 d_v 、溶射層 A_c と母材露出面 A_b との面積比 A_c/A_b 、および溶射材の回収率（歩留り） η などとの関係。

溶射層の状態は、A, B: 粗くて付着力が小さい, C: 最適, D: 付着力と歩留りが低下し、縞模様となる



第5図 溶射層表面と面粗さ(上)

A, B, C, D は第4図中の箇所のものを示す



第6図 爆・発・焰

A, B, C, D は第4図と同じ

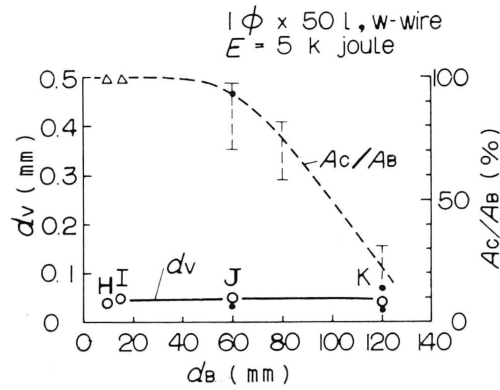
この式は、水中導線爆発の最適放電条件として与えられた式（論文1）と一致するが、

$$s = K_1 C V f^{\frac{2}{3}} \quad (1)$$

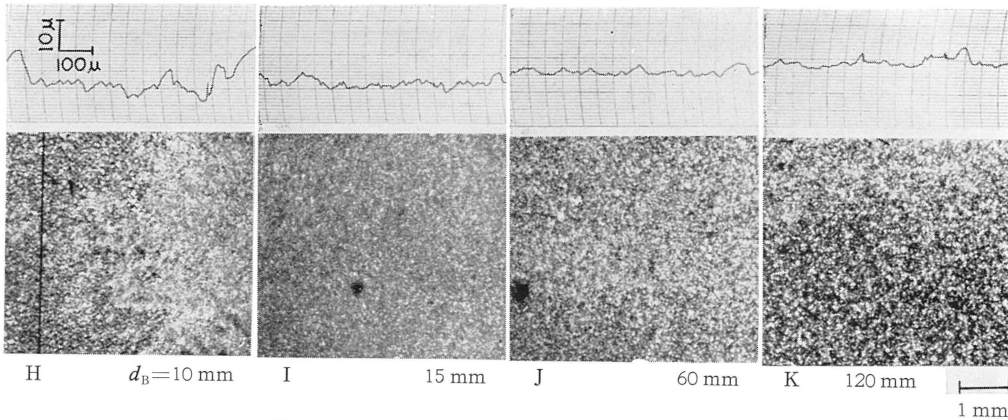
$$l = K_2 V f^{-\frac{2}{3}} \quad (2)$$

s : 最適導線断面積 [mm], l : 最適導線長 [mm], C : コンデンサ容量 [farad], V : 充電電圧 [Volt], f : 放電回路の固有振動数 [c/s].

K_1, K_2 は導線材質と導線周囲の媒体質によつてきまる定数であるが、この場合は、最適溶射層を得るためのものであるから（論文1）の場合とは大きく異なっている。



第7図 導線と母材との距離 d_B に対する溶射面粒径 d_v , および、層 A_c と母材露出面 A_B との面積比 A_c/A_B



第8図 第7図のそれぞれの溶射面と面粗さ（上）

H : 面粗れ大

I : 最適

J : ややむらがある K : むらが多く付着力も弱い
($r_{max} \approx 150$ mm)

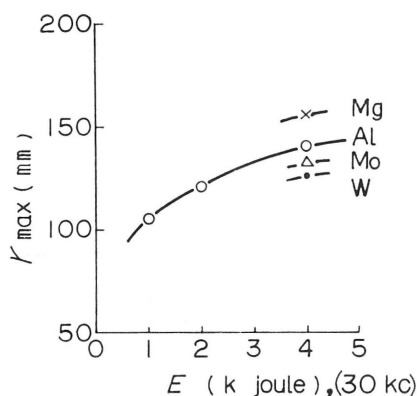
4. 母材位置の決定

4・1 導線と母材との距離 最適導線線径で導線を爆発させる際に、導線から母材までの距離 d_B と、溶射面との関係を調べると、第7図、第8図に示すように、この場合の適当な d_B は 15~40 mm である、このように適当な距離 r_0 がある。

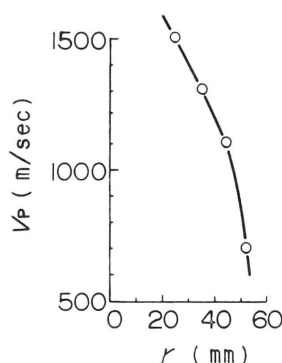
第8・H図のように $d_B \ll r_0$ 範囲では、高温高圧のため母材面が損傷を受けたり、また Al 材など低融点金属では表面が溶けたりするが、その他に、母材への放電の恐れが生ずるなどの制約を受ける。また $d_B \gg r_0$ では、溶射体の温度が下ると同時に、その飛行速度 V_v も低下して、母材への接着性が悪くなり、層の密度も低下する。さらにまた、表面に酸化層が付着するなど、コーティングには不適である。

最良の溶射層が得られる距離 r_0 は、いま、爆発焰の最大半径を r_{max} とすると、 $r_0/r_{max}=0.1\sim0.3$ で良い溶射面が得られる。これは次のことからきまる。

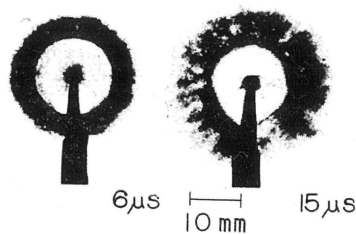
(a) 第10図に示されているように、爆発焰の膨張速度の急激な低下距離 r_c があるので、母材の設置距離 r_B は、 $r_B \leq r_c$ でなければならない。第10図の場合は、 $r_c=50$ mm, $r_{max}=150$ mm (第9図), また $r_c/r_{max}=1/3$, したがって、 $r_B \leq 1/3 r_{max}$ でなければならないことになる。



第9図 最適放電時の爆発焰の最大半径 r_{max} と充電エネルギー E との関係、他の金属も同じような傾向を示す



第10図 Al 線爆発ガスの拡がり速さ、
 $r_{max} \approx 150$ mm
(20 kV, 20 μ F, 30 kc
0.11 mm²×20 mm, Al-wire)



第11図 フューズを電気爆発させたときの瞬間X線写真 (橘氏による)³⁾
(0.33 ϕ ×29 mm, 10 kV, 1 μ F)

(b) また第11図のX線瞬間写真³⁾⁹⁾に示されているように、焰中の金属蒸気は輪状(黒い部分)に分布しており、その輪の膨張速度は、外側よりも内側の方が早く低下する傾向が見られる。したがって、母材はその内側の速度が低下する距離以内に置くことが好ましいと思われる。以上のことを考慮して r_0 は r_c よりも幾分か小さめにとる必要がある。実際、溶射実験でも $r_0=(0.1\sim0.3)r_{max}$ である。

4・2 溶射物体の母材面への衝突 母材面へは、高速のガスに続いて、溶射物体とガスの混合物、低速ガスの順に到達するが、空気中で溶射を行なう場合には、つぎのような過程を経るものと考えられる。まず、爆発焰先端の高速ガスが空気を排除しつつ、また一部は酸化しながら進行するので、溶射物体は直接空気に触れることなく母材に衝突する。事実、溶射層と母材との層や、溶射層の酸化は殆んど認められない。つぎに、遅れて到着する低速ガスや遅れた微粒の溶射体には周囲の空気が混入して来るので、溶射層表面には付着度の低い薄い酸化層ができる。この酸化層は、次回の積み重ね溶射に有害であるので、母材面上に適当な枠を作つて空気の侵入を防止するか、または不活性ガス中で行なつて、酸化し易い Mo などを溶射しても酸化しないようにする。

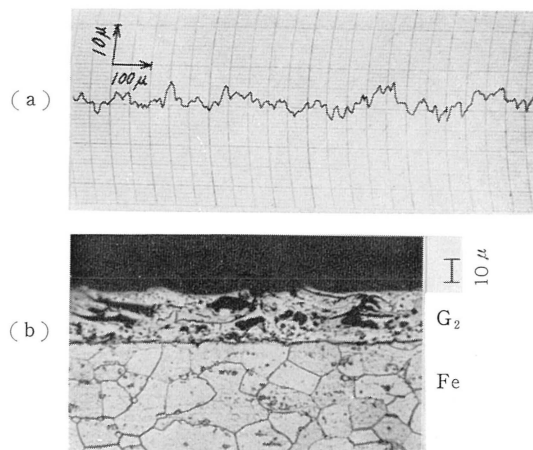
5. 溶射コーティングの実験結果

5・1 溶射層面の面粗さ 第1表に示すように、難融で硬度の高い WC-Co, 1.67 $\phi \times 50$ mm 線を軟鋼母材に5回溶射した溶射層の表面粗さは第12・a 図に示すように約 5μ (小坂式 SF-3) であつた。このように、最適条件での爆発によるものは面が平滑であつて、一般の溶射法に比べて優れている。例えば、JIS 表示面粗さ $H_{\max}$ は 70μ である。

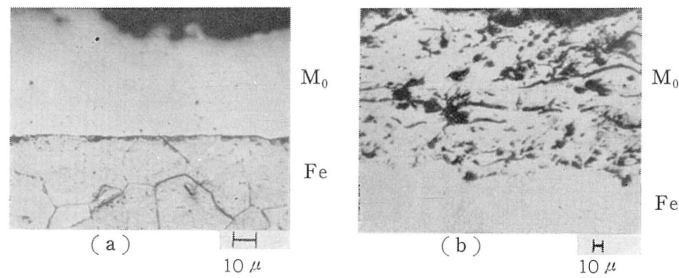
第1表 溶射実験に使つた材料の定数

	V.H.N.	S_g (g/cc)	T_m ($^{\circ}$ C)	T_B ($^{\circ}$ C)	E_Y (kg/mm 2)	ϵ (%)
Mo	200~250	10.2	2625	4800	33630	10~25
W	350~500	19.3	3410	5930	41530	1~4
WC-Co	1400~1500	15.7	2870	—	—	—
Al	60	2.7	660	2060	7220	20~50
Cu	100	8.93	1083	2360	11300	20~50

V. H. N. : ビッカース硬度, S_g : 比重, T_m : 融点, T_B : 沸点, E_Y : ヤング率, ϵ : 最大伸び量



第12図 WC-C₀ (G₂) を軟鋼板面に5回溶射した、表面粗さ (a), 溶射層の断面 (b)



第 13 図

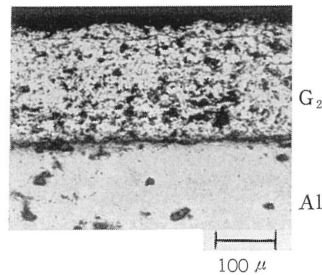
(a) は本方法による M_0 溶射層 (5 回重ね) の断面

(b) は火焰溶射ガンによる M_0 の溶射層⁴⁾ の断面

5・2 溶射層の組織

(a) 第13・a図に $1.4\phi \times 40$ mm Mo線を軟鋼母材に5回溶射した層の断面を示す。写真でもわかるように、層は空孔の少ない緻密な組織である。これらの層の密度を測定した結果、Moでは理論密度の91%、Wでは93%であった。第13・b図は他所で行なわれたアセチレンガスガンによるMoの溶射層である⁴⁾が、有孔度は20~30%もある。

(b) 層の組織は、円板状の粒子の積層からなり表面の粒径 d_v と粒厚 h_v との関係が $h_v/d_v=1/5\sim 1/10$ 程度に扁平にした形で積み重ねられている。第14図はAlにWC-Coを60回溶射し、積み重ねたものの断面であるが、この層を拡大して観察するとWCの粒子のすき間をCo層が埋めた形となっている。また、重ね合わされた部分の境界層は第15図にも示すように、エッチングしても殆んど認められない。

第14図 2ϕ の WC- C_0 (G_2) をアルミニウムに60回溶射したもの断面

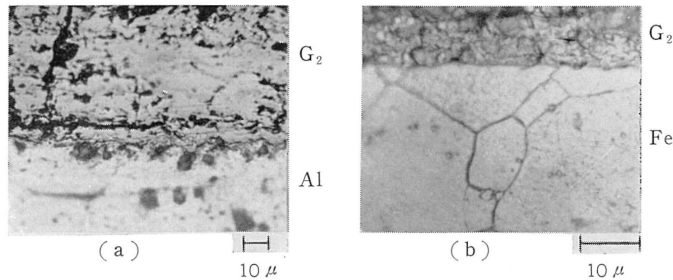
5・3 溶射層の付着度

(a) 溶射層の母材への付着力は母材の材質によってもかなり異なるが、ガス溶線式溶射ガンによるものに比べて、はるかに良好である。

Moを本方法で軟鋼に溶射したもののエポキシ材固着剥離法による接着度試験では、エポキシ材強度 (400 kg/cm^2) 以上であったが、同じ材料を火焰溶射ガンで行なった例では 173 kg/cm^2 である⁴⁾。

(b) 溶射層と母材との境界の顕微鏡写真を第15図に示す。第15・a図は $2\phi \times 60$ mm の WC-Coを

Al 母材に、10回溶射した層であるが、境界の母材に溶射体が混入しているのが見られる。また第15・b図は WC-Co を軟鋼材に溶射した層の境界写真であるが、両者の境は母材の粒界線と同じ程度によく密着していることが示されている。ただし、溶射前の母材表面はいずれも脱脂洗滌処理を充分に行なっている。



第 15 図
Al 母材へ WC-C₀ (G₂) を溶射した層の境界（断面）
軟鋼母材に WC-C₀ を溶射した層の境界（断面）

6. 結 論

溶射金属線の放電爆発による溶射コーティングについて実験的研究を行なった結果、一つの溶射方法として可能性があることを確かめることができた。この方法は、放電により直接溶射材を溶融爆発させて溶射させるので爆発エネルギー密度が高く、かつ、その制御が容易であるため溶射層は組織、仕上がり精度、強度などの面で多くの優れた特徴をもっていることが明らかになった。

溶射を行なうための条件および方法を別挙すると、

- 導線寸法は (1), (2) 式で与えられる。
- 導線から母材までの距離は爆発焔の最大半径の 0.1~0.3 倍が適当である。
- 以上の a), b) の条件は母材の材質にはほとんど無関係に成立つ。
- ガスおよび溶融粒子の衝突角は 45° 以上である必要がある。
- 爆発ガスの雰囲気中で溶射されるので、酸化は一般に認められないが、特に、Mo などのように酸化し易い物質の溶射をする場合には、母材面に適当な枠を設けて爆発ガス中に空気が混入しないようにすれば大気中で溶射を行なっても酸化を防ぐことができる。

つぎに、溶射層の性質は、

- 1回の溶射による溶射層の厚さおよび有効溶射面積は充電エネルギー E 、充電電圧 V 、溶射材の材質および母材との距離 d_b によつて決まるが、例を示すと W 線の1回の溶射による溶射層の厚さは 7.5 μ 、溶射面積は約 50 mm×28 mm であつた。ただし、本実験に用いた放電回路の固有振動数は 22 kc である。

- 溶射層の密度は理論密度の 90 % 以上で、繰返し溶射によつても lamination は見られない。

- 溶射層の面粗さは約 5 μ である。

- d) 溶射層の付着力は 400 kg/cm^2 以上である.
- e) 母材への影響は殆んど認められずまた溶射後の再溶融処理は不要である.
- f) 溶射材の回収率(歩留り)は現在のところ約 50% でやや少ない.

以上本報告では、本方法による溶射条件と溶射層の性質についての実験結果を述べたが、今後導線爆発および溶射の機構、すなわち溶射粒子の放射および母材への衝突機構や接着部の拡散の問題など、力学的、金属学的な多くの問題について基礎的に研究解析されなければならない。

本実験は応力研における高エネルギー工学研究の一部であつて、日本タングステン株式会社との協力によつて行なわれたものである。最後に実験ならびに整理に協力を惜しまれなかつた日本タングステン K. K. の福永寛喜技師および本研究所周崎康治技術員に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 栖原寿郎, 福田重久: 応用力学研究所所報, 第 26 号 (1967)
- 2) 栖原寿郎, 北島一徳, 福田重久: 塑性と加工, 8 巻 77 号 (1967)
- 3) 橘 房夫: 金属物理, Vol. 8, No. 4 (1962)
- 4) 梅津貞夫: 日本溶射協会誌, Vol. 2, No. 1.
- 5) 多賀谷正義: 金属, 1967 年 3 月 1 日号.
- 6) W. G. Chace: The phys. Fluid, Vol. 2, No. 2, (1959)
- 7) H. Arnold, W. M. Conn: Chace & Moore "Exploding Wiers" Vol. 2.
- 8) J. Nasilowski: Chace & Moore "Exploding Wiers" Vol. 3.
- 9) W. Müller: Chace & Moore "Exploding Wiers" Vol. 1.

(昭和 42 年 11 月 6 日 受理)