新技術・新製品

放電を利用した革新的コーティング技術

荒木 健^{☆1}, 中野 善和^{☆1}, 尾崎 毅志^{☆1}, 曾根 孝典^{☆1}, 寺本 浩行^{☆2},
岡根 正裕^{☆2}, 中村 和司^{☆2}, 後藤 昭弘^{☆2}

^{☆1}三菱電機(株)先端技術総合研究所, 〒229-1195 相模原市宮下 1-1-57.

^{☆2}三菱電機(株)名古屋製作所, 〒461-8670 名古屋市東区矢田南 5-1-14.

Innovative Coating Technology Using Electrical Discharge

Takeshi Araki^{☆1}, Yoshikazu Nakano^{☆1}, Tsuyoshi Ozaki^{☆1}, Takanori Sone^{☆1}, Hiroyuki Teramoto^{☆2},
Masahiro Okane^{☆2}, Kazushi Nakamura^{☆2} and Akihiro Goto^{☆2}

^{☆1}Advanced Technology R & D Center, Mitsubishi Electric Corporation, 1-1-57 Miyashimo, Sagami-hara 229-1195, Japan.

^{☆2}Nagoya Works, Mitsubishi Electric Corporation, 5-1-14 Yada-minmai Higashi-ku, Nagoya 461-8670, Japan.

Received October 31, 2007

1 開発の背景, 目的

部品の表面コーティング法には, CVD (Chemical Vapor Deposition), PVD (Physical Vapor Deposition), めっき, 溶接, 溶射などがある. 航空機エンジン部品や機械部品では, 部品の一部分に耐摩耗コーティングが必要とされる場合が多く, また, 部分補修や補強が必要とされる場合も多い. CVD, PVD, めっき, 溶射では, 部品の一部分への選択的なコーティングにはマスクングが必要なため手間がかかる. 一方, 溶接はマスクングは不要であるが, 余肉が発生したり溶接部が局所的に加熱されて被処理部品が熱変形や割れを起こしたりする恐れがあった. このような問題を解決するため, 微小なパルス放電により信頼性の高い被膜を必要な箇所に精度よくコーティングできる技術を開発した¹⁻³⁾. 我々はこの技術を微小放電の利用に因んでMicro Spark Coating (略してMSCoating)と呼んでいる.

2 技術内容, 特徴

MSCoatingの原理をFig.1に示す. 電極には金属粉末や導電性セラミックス粉末の成形体を用いる. 加工油中で電極と基材との間に微小なパルス放電を発生させると, 放電の熱によって電極と基材の表面が熔融する. この際, 放電に伴って生じる気化爆発により溶けた電極材料が飛散して基材表面の熔融域に移行し, 放電終了後に凝固して被膜が形成される. ひとつのパルス放電の大きさは10~50 μ m程度であり, 毎秒10000回程度発生する. 放電が発生している間, 電極と基材間はサーボにより常に数十 μ m程度の一定間隔を保つように制御される. MSCoatingに用いる電極をFig.2に示す. 金属粉末を低密度に成形したものであり, バルク金属に比べて熱伝導率が数分の1と低い特徴を有する. この低熱伝導性により, パルス放電時の電極での熱の放散が抑えられて熱の集中度が高まる. この結果, 電極の熔融領域が基材側のそれに比べて大きくなり, 飛散する熔融物の量が電極側の方が多くなるので基材側に電極材料を成分とした被膜が形成される. このように, MSCoatingでは電極に低密度の粉末成形体を用いること

Fig.1 Principle of MSCoating.

Fig.2 MScoating electrode.
(a) Appearance, (b) Internal structure

が大きな特徴である。以下にMSCoatingの主な特長を挙げる。

①基材への熱的ダメージが小さい

MSCoatingは、微小なパルス放電によるコーティングのため、基材への熱入は最表面に限られ、基材全体への熱的ダメージはほとんどない。そのため、基材の熱変形や割れなどが生じない。Fig.3(a)は板厚0.3mmの薄い鉄鋼基材上にSUSを0.1mmコーティングした例である。溶接では基材の熱変形が生じやすく薄板基材へのコーティングが困難であるが、MSCoatingでは基材の板厚がサブミリオーダーと薄くても熱変形がなく良好にコーティングできていることがわかる。

②金属厚膜の形成(肉盛)が可能

繰り返しのパルス放電により電極の金属粉末の溶融体が基材に重なって溶着していくことで金属厚膜が形成される。成膜速度はコーティング面積に反比例するが、数 cm^2 程度の面積では数百 μm /分程度の速度が得られ、短時間でミリオーダーの肉盛コーティングが可能である(Fig.3(b))。

③マスキング不要

MSCoatingではコーティング領域が電極と基材との対向面に限られるので、マスキングを行うことなく必要な箇所に必要な寸法形状のコーティングが可能である。Fig.3(c)は星形の断面形状を有する電極でコーティングした場合、Fig.3(d)は円柱状の電極をリング状部品の内周部に挿入してコーティングした場合であるが、電極形状を反映した領域にコーティングできることがわかる。

④被膜と基材の密着力が強い

MSCoatingにより形成したCo被膜について、電子線マイクロアナライザにより鉄鋼基材と被膜の界面における成分元素の線分析を行った結果をFig.4に示す。基材と被膜の界面では各成分元素の濃度が傾斜的に変化しており、強固な密着力を実現している。

⑤様々な材料の被膜形成が可能

MSCoatingでは、Fe、Co、Niの他、WやMoなどの高融点で

溶けにくい金属や、Cuなどの高熱伝導で発熱しにくい金属についても、金属粉末の低密度成形により電極の熱伝導率を下げることで放電時の熱の集中度を高めて溶けやすくし、基材上に緻密な被膜を形成することが可能である。また、合金ではFe-C系、Fe-Cr系、Co-Cr系、Ni-Cr系など幅広い種類の被膜を形成することができる。導電性セラミックスについては、TiCやWCなどの被膜形成が可能であり、また、これらを金属と複合化したWC-Coなどのサーメット超硬被膜の形成も可能である。

3 用途、適用範囲

Fig.5はMSCoating装置の外観である。放電加工機をベースとしたもので、本装置を用いて各種部品へのコーティングを実施している。電極材料を変えることで被処理部品へ様々な機能性被膜を形成することができ、例えば電極に合金粉末の成形体を用いた場合、Co-Cr系では高温耐摩耗被膜、Ni-Cr系では耐熱被膜、SUSでは耐食被膜などが得られる。一例としてFig.6(a)にCo-Cr系被膜の断面写真を示す。Co-Cr母相中に潤滑性に優れたCr酸化物が微細に分散した組織となっており、これにより優れた高温耐摩耗性を実現している⁴⁾。電極に導電性セラミックスのTiCやWCの粉末成形体を用いた場合は膜厚数 μm ～20 μm 程度の硬質薄膜が得られる。Fig.6(b)にTiC被膜の断面写真を示す。基材表面に膜厚3 μm 程度の平滑な被膜が形成されており、HV2000以上のビッカース硬度を有する。これらの機能性被膜は用途に応じて使い分けるこ

Fig.4 Element distribution at the interface between MSCoating layer and substrate.

Fig.3 Examples of MSCoating. (a) MSCoating for thin substrate, (b) Thick MSCoating (Cladding), (c) Star-shaped MSCoating without masking, (d) MSCoating for inside surface of cylindrical part

Fig.5 MSCoating machine.

Fig.6 Cross-sectional view of MSCoating layer.
(a) Co-Cr alloy layer, (b) TiC layer

Fig.7 Application to turbine blades used in an aero engine.

とができ、例えば Co-Cr 系被膜はエンジン部品やガスタービン部品などの高温下での摩耗が激しい部分へのコーティング用途に適している。Fig.7は航空機エンジンのタービンプレードへの適用例⁵⁾であるが、数百～千℃近い高温環境下で隣合う翼がノッチの部分でこすれ合うため、その箇所に MSCoating を適用し Co-Cr 系被膜を形成することで部品の耐久性と信頼性の大幅な向上を果たしている。また、TiC 薄膜は寸法精度の厳しい機械部品や金型などの機械的干渉部分へのコーティング用途に適している。Fig.8はタレットパンチや打ち抜き金型への適用例²⁾であるが、こすれ合う端面やエッジ部分に TiC 薄膜を形成することで耐摩耗性が向上し、従来比 3 倍以上の長寿命化を実現している。

4 今後の展開

MSCoating の特長と適用例を述べた。本技術によれば小型

Fig.8 Application to machine parts.
(a) Turret punch, (b) Punching die

部品や薄肉部品に対して信頼性の高い被膜を必要な箇所に精度よくコーティングできるようになる。航空機エンジン部品や機械部品の他、自動車、エネルギー、医療など様々な分野への適用が期待される。

5 特 許

MSCoating 装置、電極、アプリケーションなどを含めてこれまでに 100 件以上の特許を出願している。主なものは次のとおりである。

特許番号：3227454, 3409032, 3852580, 3931656。再公表特許番号：WO2004/011696, WO2004/029329, WO2004/033755, WO2004/106587, WO2004/108989, WO2004/108990, WO2004/111305。

謝 辞

本技術の開発と適用では、株式会社 IHI の落合氏をはじめ多数の関係者にご支援いただきました。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) A.Goto, T.Magara, Y.Imai, H.Miyake, N.Saito and N.Mohri: "Formation of Hard Layer on Metallic Material by EDM", Journal of the Japan Society of Electrical Machining Engineers, 31(68)(1997)26-31.
- 2) K.Matsukawa, M.Yoshida, T.Moro, H.Miyake and A.Goto: "Houden Hyoumen Syori Gizyutu no Kaihatu to sono Riyou", Mitsubishi Denki Giho, 75(7)(2001)27-30.
- 3) M.Akiyoshi, A.Goto, K.Shigyo, K.Nakamura, H.Ochiai and M.Watanabe: "Metallic Layer deposited by Electrical Discharge", Proceedings of JSPE Semestrial Autumn Meeting, 2004A(2004)571-572.
- 4) H.Teramoto, A.Goto, K.Nakamura, M.Akiyoshi, M.Okane, T.Araki, H.Ochiai and M.Watanabe: "Development of Coating Technology by Electrical Discharge", Proceedings of JSPE Semestrial Spring Meeting, 2005S(2005)1329-1330.
- 5) M.Okane, K.Nakamura, A.Goto and H.Teramoto: "Development of MSCoating that is Coating Technology using Electrical Discharge", Die and Mould Thecnology, 21(8)(2006)120-121.