肉盛溶接の高付加価値技術の
実際

PTA 法によるアルミニウム合金表面 への厚膜硬化層の形成技術*

橋 本 武 典**

Formation of Hardened Layer on Aluminium Alloy Surface by PTA process*

by Takenori HASHIMOTO**

キーワード：プラズマアーク，アルミニウム合金，表面改質，耐磨耗性，硬化層，粉体肉盛

1. は じ め に

アルミニウムおよびその合金は、軽量であるために自動車などの輸送機器関係に多く使われている。しかしながら、その使用環境はより過酷になり更なる性能の向上が要求され、アルミニウムの高機能化が大きな技術課題となっている。その一つに耐磨耗性を中心とする表面改質技術がある。ここでは、特にプラズマアーク粉体肉盛法(Plasma Transferred Arc process：以下 PTA 法と略す)によるアルミニウム合金の表面改質法について説明する。

2. アルミニウム合金の耐磨耗性に必要な性能

アルミニウム合金の耐磨耗性を向上させるために必要な性能を簡単に述べる。

アルミニウム合金の耐磨耗性の向上は従来より多く研究されており、種々の方法がある。一般には、硬質アルマイトや Cr メッキ等があるが、これらは一般に硬質層の厚さが薄く過酷な磨耗条件では十分な耐磨耗性が得られない。また、逆にアルミニウム鋳物に代表される高シリコン合金では材料全体が同一組成であり、耐磨耗性を必要としない部分でも高シリコンとなり、強度的な問題が生じる（高価な合金を用いる場合はコストの面でも不利になる。）

このような観点から、アルミニウム合金の耐磨耗性の向上には局部的で、かつ比較的厚い硬化層を形成する必要がある。

3. プラズマアークによる厚膜硬化層の形成の特徴

プラズマアークによる厚膜硬化層は母材を溶融して、硬化層を形成するために母材との密着性が溶射などに比べ高く、さらにミリオーダーの厚膜硬化層が容易に形成できる。

厚膜硬化層の形成には、いくつかの熱源が用いられている。表 1¹⁾はこれらの熱源のパワー密度を示したものである。

この表のように、プラズマアークのパワー密度はアークとレーザ、電子ビームの中間に位置する。また、装置としても鉄鋼材料の肉盛装置としての実績があり、操作性およびコストの面でも、レーザおよび電子ビームに比して優れている。

さらに、PTA 法には以下のような特徴がある。

- 1) 添加材に粉末を用いるのでワイヤやロッドにできない難加工材を硬化材料として利用できる。
- 2) 炭化物などの非金属を複合させた、いわゆる“サーメット”の硬化層が得られる。

表 1 熱源のパワー密度

Power source		Power density (kW/cm ²)
Arc	Ar-arc	<15
	Plasma arc	50-100
Electron beam	pulse	>10000
	continuous	>1000
Laser beam	pulse	>10000
	continuous	>100

**正 員 昭和アルミニウム (株) Menber, Showa Aluminium corporation

- 3) 母材の溶け込みをコントロールしやすく、溶け込みの少ない硬化も可能である。
- 4) ティグアークプロセスに比較してかなり高能率な施工ができる。
- 5) 平滑なビード形状が得られ、仕上げ機械加工の簡略化が図れる。
- 6) 大面積化が容易である。

4. PTA 法による厚膜硬化層の形成

プラズマアーク粉体肉盛法は、従来より鉄鋼材料に対する肉盛法として使用されており肉盛技術としては、実績のある方法である。図 1²⁾に PTA 法を模式的に示す。PTA 法はプラズマアークにより母材表面層を一定移動

図 1 プラズマアーク粉体肉盛プロセスの概要

動速度で溶融し、同時にトーチ内から金属またはセラミックス粉末をプラズマアーク中を通して溶融池に供給する。これにより溶融部に母材と供給された粉末との複合硬化層を形成する。アルミニウム合金を対象としているため PTA 肉盛電源には、インバータ式交直両用プラズマアーク溶接機が用いられる。放電極性とシールドガスとの組み合わせは、実用的には交流+アルゴンガス (AC-Ar) と直流正極性+ヘリウムガス (DCEN-He) の 2 種類がある。図 2³⁾は、それぞれの放電極性を用いた場合の適正硬化層の形成条件とトーチ移動速度の関係を示す。

図中の○印が、ビード表面が滑らかで良好な硬化層の得られる条件を示している。この適正条件範囲は一般的にプラズマ電流が大きいほど適正条件範囲は広がる。また、DCEN-He では AC-Ar よりもアーク電圧が高く、かつプラズマアーク集中度が良好なために、同一電流では高速度での形成が可能である。

5. 金属粉末添加による硬化層の形成とその特性

金属粉末添加では、溶融 Al との反応により硬化層を形成し、主として硬質の Al 基金属間化合物などにより、硬化層の硬さを増加させる。このため硬化層の形成にはアルミニウムと添加元素の状態図が大きく関係する。共晶反応を有するものではアルミニウム溶融部全域に均一に混合された組織であるが、包晶反応では溶融部の表面層に局所的に金属間化合物が形成され、内部まで混合されていない。各種金属粉末に対して検討した結果、硬化層の形成は図 3⁴⁾に示す 4 形態に分類される。

図 2 AC-Ar および DCEN-He による、適正条件範囲とトーチ移動速度の関係

アルミニウムと共晶反応を有し液相温度も比較的低い銅やシリコンでは均一な硬化層が得られるが、クロムやチタンのように包晶、偏晶反応を有し、液層温度の高い金属粉末では、表面に化合物を形成し、均一な硬化層は得られ難い。またニッケルのように包共晶反応を有する場合には、両者の中間的な形態を示し、添加量が少ない場合には比較的均一な硬化層が得られる。さらに、融点が3000℃を越えるタンタルやタングステンでは、アルミニウムと反応せずに硬化されることなく、後述するセラミックスと同様金属粒子のまま混合された形態となる。

図4は硬化層の合金量と硬さの関係を示す。合金量の増加とともに硬さも増加する。しかし、HV 300以上では、添加元素によらず硬化層には割れが発生し、金属添加では硬さの増加には限界がある。金属元素の中では、硬化層の形成の容易さおよび硬さの観点より、銅およびシリコンが有効である。この結果は耐磨耗アルミニウム合金の合金組成と同様の傾向を示している。

6. セラミックス粉末添加による複合化層形成とその特性

前述したように、金属系の合金化では硬化層の硬度が高くなると割れが発生し耐磨耗性の改善には限界がある。そこで硬化層として粒子分散複合層を形成することによる耐磨耗性の改善を試みた。特にPTA法では前述のように粉末状の添加は容易であるために硬化層の形成には溶融池内へセラミックス粒子を添加することにより

図3 金属粉末添加により得られた硬化層の代表的な形態分類（断面組織の模式図）

行うことができる。種々のセラミックスによる硬化層の形成形態をまとめると図5のようになる。

セラミックスの融点が2200～2500℃以下では、 Cr_3C_2 のようなType II（溶融した粒子が表面に堆積する）の形態をとる。これ以上の融点を有するセラミックスでは、Type Iの粒子分散複合化層を形成することが可能である、しかし複合化層内の粒子の分散状態は粒子の密度と粒径が大きく影響する。図6⁵⁾はこの両者の関係を示したものである。

この図より均一分散層の形成はセラミックスの比重と粒径により、ある程度まで制御可能であることがわかる。

また、粒子の高分散密度化は多層盛法で可能である。

図4 金属粉末添加PTA法による硬化層の硬さと添加金属量との関係

図5 炭化物セラミックス粉末添加により得られる複合化層の代表的な形態分類（断面組織の模式図）

図6 PTA 複合化層内における炭化物粒子の分散状態に及ぼす粒子径と比重の影響

図7 TiC 粒子分散複合化層の硬さと TiC 体積率との関係

これは一層盛法では粉末供給量を増加しても、複合化層内への混入の程度には限界が存在するためである。図7⁵⁾は、このようにして得られた複合化層の TiC 体積率と硬さの関係を示す。両者の関係は粒子分散型の複合則にはほぼ従っており、硬さは Ti 体積率が約 50% 以上において急激に増加する。

7. 金属-セラミックス複合硬化層の形成とその特性

これまでに述べたように、金属添加では HV 500～700 の合金化層を比較的容易に得ることができるが、割れが発生しやすい欠点がある。このため、割れない状態で HV 300 以上の硬さを得ることは困難である。またセラミックス添加では Al マトリックスの強度が弱いために、セラミック添加のみでは硬さおよび耐摩耗性の著し

図8 銅と TiC の複合添加により得られた PTA 複合硬化層のマイクロ組織 (黒い粒子: TiC, 白い粒子: CuAl₂, 灰色部: Al+CuAl₂)

図9 銅単独添加, TiC 単独添加および銅+TiC 複合添加層の比摩耗量 Ws と母材純 Al および鉄鋼材料 (軟鋼 SS 400, ステンレス鋼 SUS 304) との比較 (大越式迅速摩耗試験)

い向上は望めない。このため、両者の同時添加による重畳効果が有効であると考えられる。すなわち金属添加により、硬化層を形成することにより Al マトリックスの強化を図り、そこに硬質セラミックス粒子を添加することにより、両者のハイブリッド硬化層を形成する方法である。

図8⁵⁾はその代表例として金属に銅, セラミックスに TiC を複合添加したハイブリッド層のマイクロ組織を示す。写真中で黒く見える大きな粒子が TiC であり、その周囲を白色の棒状化合物である θ (CuAl₂) 相と、さらに両者の隙間を θ 相とアルミニウムとの共晶が完全に埋めている。このような緻密な組織を呈しているために、硬さは HV 550 に達しており、割れは認められない。また図9⁵⁾は、耐摩耗性を銅および TiC 単独添加層と比較したものである。摩耗試験は大越式迅速摩耗試験により評価した。銅および TiC 単独添加では、耐摩耗性はそれぞれ母材アルミニウムの約 10 倍にまで改善される。しかし

これ以上の改善は得られなかった。これに対して、複合添加ではさらに一段と耐摩耗性が向上し、母材アルミニウムの約 100 倍以上にまで改善される。

なお複合添加の方法には、金属粉末およびセラミックス粉末を同時に PTA 法で添加する方法のほかに、金属添加をたとえば銅の場合には、Al-Cu 合金棒や AL-Cu 複合ワイヤを用いて添加する方法がある。また添加材料のみならず、添加方法でも、あらかじめティグ法やミグ法で硬化層を形成後、その上に PTA 法でセラミックス粒子を添加するなど、各添加方法の複合化も有効である。

8. お わ り に

PTA 法による厚膜硬化層の形成について解説した。読者の中には、実用的な話を期待していた方も多いと思う。現在この分野の話題は多いが現実的に私の知る限り本方法の実用化は数少ない。

しかしながら、近年ではアルミニウム合金の利用が種々の分野で進められているもののアルミニウム合金は鉄鋼材料に比してコストが基本的に高い。そのために、耐摩耗性のような付加価値をつけることは性能としては有効であるもののコスト高は避けられない（量との関係もあるが現状ではコストは高いはず）。

さらに、ここで示したような技術はノウハウの部分（耐摩耗性は磨耗状況により要求される性能が大きく異なるので適正な硬化層を形成しなければならない）が多いためあまり表にでてこないのではないかと思う。

ここでは、本方法の可能性について述べることににより、読者の方々が本方法に興味を持たれ、本方法の適用を検討し、さらにはアルミニウム合金の利用を検討していただければ、この解説も有効であったと思う。

参 考 文 献

- 1) 溶接学会編：溶接便覧(改訂3版)，丸善，9章，462(1977)。
- 2) 松田福久，中田一博，橋本武典：プラズマアーク粉体アロイング法による Al 合金表面への TiC 粒子アロイング層の形成条件の検討，溶接学会論文集，第 13 巻，3 号，395 (1995)。
- 3) 橋本武典，中田一博，松田福久：大阪大学溶接工学研究所高エネルギー溶射研究センター1993 年公開研究シンポジウムプロシーディングス，59 (1993)。
- 4) 橋本武典：プラズマアーク粉体アロイング法によるアルミニウム合金表面への厚膜耐摩耗層の形成に関する研究，大阪大学大学院工学研究科学学位論文 (1995)。
- 5) K. Nakata, T. Hashimoto, F. Matsuda: "Surface Hardening of Aluminum Alloy by PTA Overlaying Process", Prof. 1st Int. Conf. on Proceeding Materials for Properties, Edited by H. Henein and T. Oki, TMS, 1089 (1993)。

日本学術会議 接合工学専門委員会 平成11年度溶接シンポジウム

短時間、低コスト、適正品質組立技術の展開 ー材料、プロセス及び組立設計ー

テキスト 3,000 円

ご注文その他については下記へお問い合わせ下さい。

社団法人 溶接学会

〒101-0025 東京都千代田区神田佐久間 1-11

☎03-3253-0488 ファックス03-3253-3059