

# 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

橋本 武典\*・中田 一博\*\*・松田 福久\*\*\*

## 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。その一つに耐摩耗性を中心とする表面改質技術がある。

ここでは、とくにプラズマアーク粉体肉盛法(Plasma Transferred Arc process: 以下PTA法とする)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 プラズマアークによる厚膜硬化アロイング層の形成の特徴

厚膜アロイング層は母材を溶融して、アロイング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、さらにミリオーダの厚膜硬化層が容易に形成できる。

厚膜アロイング層の形成には、いくつかの熱源が用いられている。表<sup>1)</sup>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ー、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で実績があり、操作性およびコストの面では、レーザー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アロイング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”のアロイング層が得られる。

\*ハシモト タケノリ/昭和アルミニウム(株)小山製造所  
\*\*ナカタ カズヒロ/大阪大学接合科学研究所  
\*\*\*マツダ フクヒサ/(財)発電設備技術検査協会

表 熱源のパワー密度

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

- 3) 母材の溶込みをコントロールしやすく、溶込みの少ないアロイングも可能である。
- 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。

## 3 PTA法による厚膜アロイング層の形成

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1<sup>2)</sup>(次ページ)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アロイング層を形成する。Al合金を対象としているために、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

#### 4 金属粉末添加によるアロイング層の形成とその特性

金属粉末添加では、熔融Alとの反応によりアロイング層を形成し、主として硬質のAl基金属間化合物などにより、アロイング層の硬さを増加させる。このためアロイング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。

写真1<sup>3)</sup>に、代表的なアロイング層としてアルミニウムと共晶反応を有するシリコンおよび包晶反応を有するチタンを添加した場合の断面マクロ組織と粉末供給量の関係を示す。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部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、アロイング層の形成は図3<sup>4)</sup>に示す4形態に分類される。

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アロイング層が得られるが、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、均一なアロイング層は得られにくい。またニッケルのように包共

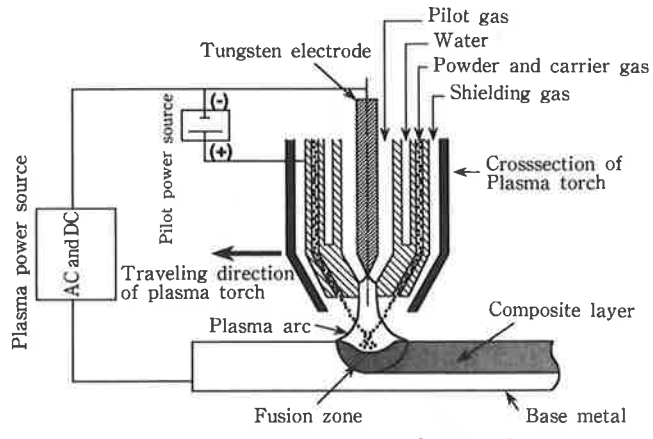


図1 プラズマアーク粉体肉盛プロセスの概要

ある。

図2<sup>3)</sup>は、それぞれの放電極性を用いた場合の適正アロイング層の形成条件とトーチ移動速度の関係を示す。交流では、交流周波数200Hz、正極(EN)と逆極(EP)の時間比率( $T_{EN}/T_{EP}$ ) 75/25、さらに逆極電流( $I_{EP}$ ) 80Aとそれぞれ一定とし、正極電流( $I_{EN}$ )のみを変化させることにより、平均電流( $I_{MEAN}$ : プラズマ電流)を100から200Aまで変化させた。この図のようにトーチ移動速度はAC-Arでは300mm/min、DCEN-Heでは約1000mm/minまで変化させ、粉末供給量を5から15g/minまで変化させた。

図中の◎印が、ビード表面が滑らかで良好なアロイング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くなる。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性が良好なために、同一電流では高速度での形成が可能である。

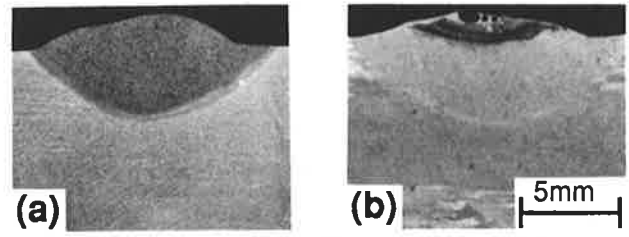


写真1 アロイング層断面マクロ組織

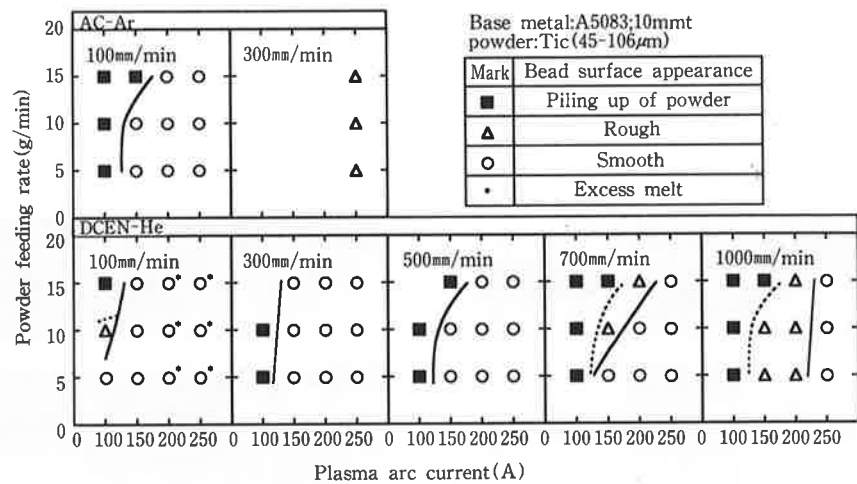


図2 AC-ArおよびDCEN-Heによる適正条件範囲とトーチ移動速度の関係

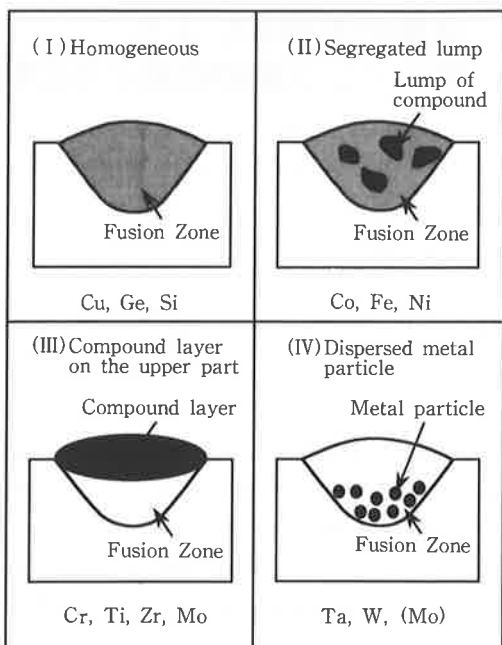


図3 金属粉末添加により得られたアロイング層の代表的な形態分類 (断面組織の模式図)

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アロイング層が得られる。

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アロイングされことなく後述するセラミックスと同様そのまま金属粒子として混合された形態となる。

図4はアロイング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、HV300以上では、添加元素によらずアロイング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、アロイング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。

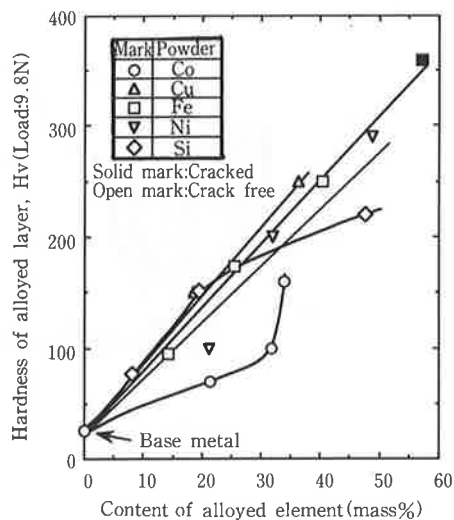


図4 金属粉末添加PTA法によるアロイング層の硬さと添加金属量との関係

## 5 セラミックス粉末添加による複合化層形成とその特性

熔融池内へセラミックス粒子を添加することにより、Al合金表面にセラミックス粒子分散層を形成する方法である。図5および6<sup>4)</sup>に各種炭化物系セラミックスを添加した時のアロイング層表面外観と、その断面組織を示す。母材はA5083であり、PTA条件は図中に示してある。比重の小さい $B_4C$ では母材内部粒子は混入されず熔融池表面にアルミニウムを含浸した相を形成した。

また $Cr_3C_2$ では熔融アルミニウムと反応し、表面でその化合物層を形成した。その他のセラミックスについては、セラミックス粒子は熔融池内部に混入され粒子分散型複合化層を形成することができる。このような形態をまとめると図7 (次ページ) 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TypeII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

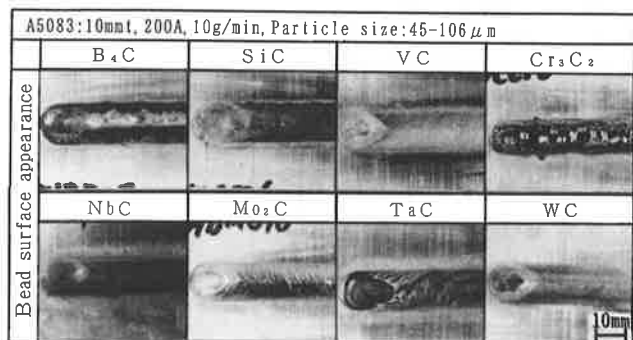


図5 各種炭化物セラミックス粉末添加複合化層外観

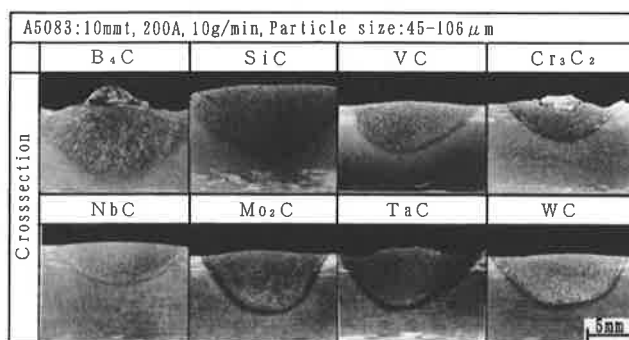


図6 各種炭化物セラミックス粉末添加複合化層断面マクロ組織

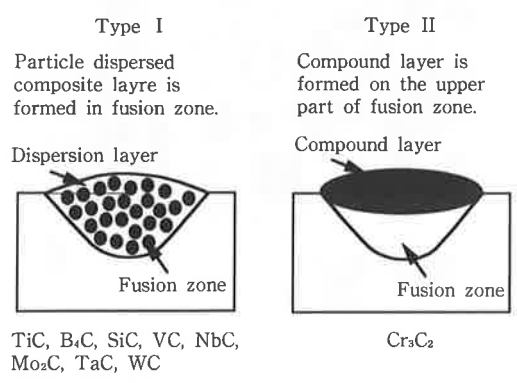


図7 炭化物セラミックス粉末添加により得られる複合化層の代表的な形態分類 (断面組織の模式図)

は粒子の密度と粒径が大きく影響する。

図8<sup>5)</sup>に炭化物セラミックスの複合化層内での粒子の分散状態と比重および粒径の影響を示す。B<sub>4</sub>Cのように軽い粒子では内部に混合されずに、表面において複合化層が形成される。これに対して重いWCなどでは溶融池底部に集まる傾向を示す。

図9<sup>5)</sup>はこの両者の関係を図示したものである。この図より均一分散層は粒子密度と粒径により、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。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10<sup>5)</sup>はTiCの三層盛複合化層の断面マイクロ組織を示す。

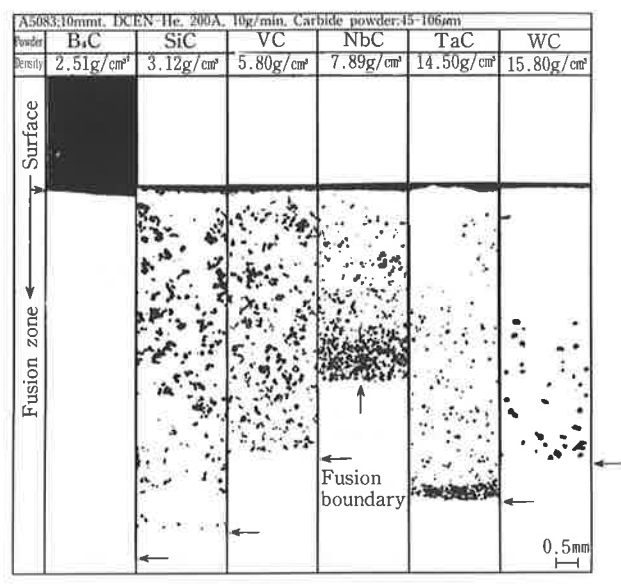


図8 PTA複合化層断面における各種炭化物粒子の分散状態

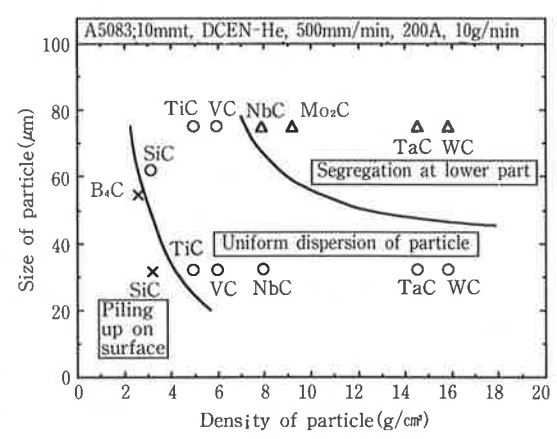


図9 PTA複合化層内における炭化物粒子の分散状態に及ぼす粒子径と比重の影響

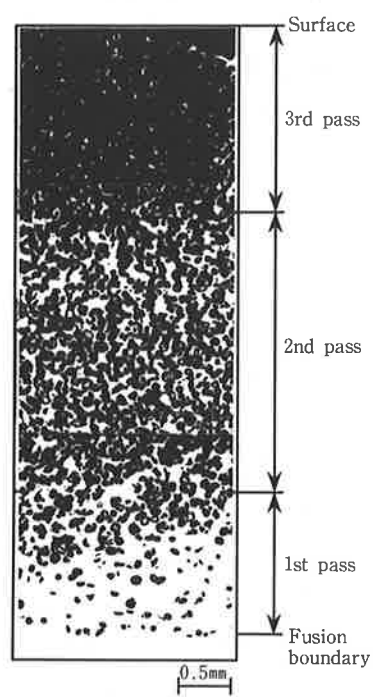


図10 多層盛方式のPTA法で得られたTiC粒子分散複合化層の断面マイクロ組織

## 6 金属-セラミックス複合アロイング層の形成とその特性

金属添加では、HV500~700の合金化層を比較的に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HV300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、硬さおよび耐摩耗性の向上のためには、Alマトリックスの強化が必要である。このた

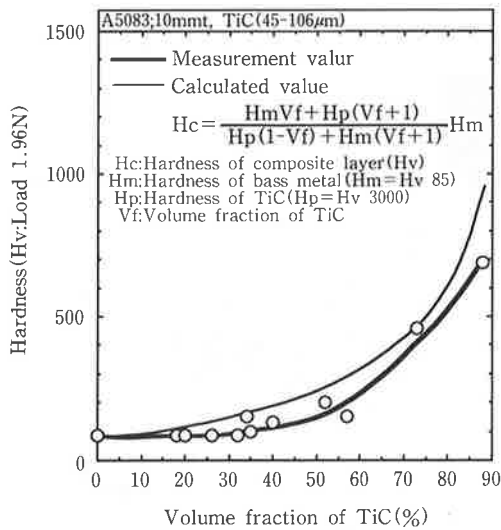


図11 TiC粒子分散複合化層の硬さとTiC体積率との関係

めには、両者の同時添加による重量効果が有効である。

すなわち金属添加により、アロイング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層を形成する方法である。

写真2<sup>5)</sup>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 $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) 相と、さらに両者の隙間を $\theta$ 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HV550に達しており、割れは認められない。また図12<sup>5)</sup>は、耐摩耗性を銅およびTiC単独添加相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

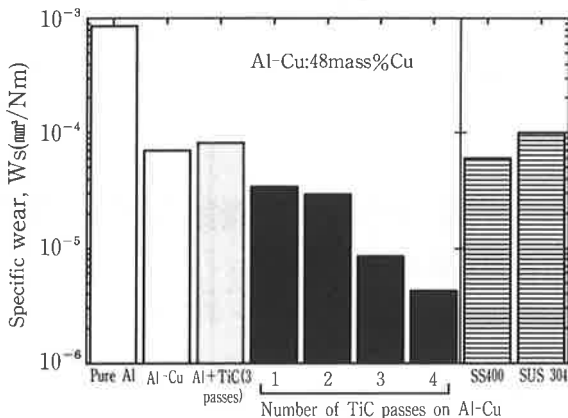


図12 銅単独添加、TiC単独添加および銅+TiC複合添加層の比摩耗量 $W_s$ と母材純Alおよび鉄鋼材料(軟鋼SS400, ステンレス鋼SUS304)との比較(大越式迅速摩耗試験)

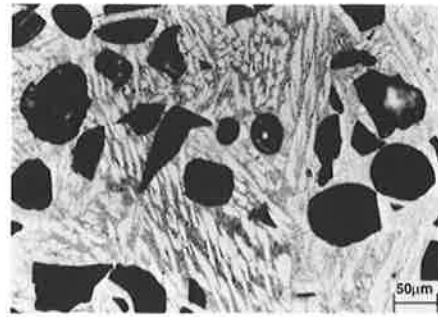


写真2 銅とTiCの複合添加により得られたPTA複合アロイング層のマイクロ組織(黒い粒子:TiC, 白い粒子:CuAl<sub>2</sub>, 灰色部:Al+CuAl<sub>2</sub>)

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アロイング層を形成後、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。

## 7 おわりに

PTA法による厚膜アロイング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。そのためにこのような内容になったことを残念に思う。

しかしながら、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放射線センター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)