

解説

アルミニウム合金の厚膜表面硬化技術

原稿受付 1996年9月2日

“トライボロジスト” 第42巻 第2号 (1997) 123~128

中 田 一 博

大阪大学 接合科学研究所

(〒567 大阪府茨木市美穂ヶ丘11-1)

1. 緒 言

最近、特に注目されている自動車や鉄道車両などの輸送機器のアルミ化にみられるように、Al合金は構造物の軽量化を進めるうえで鍵を握る材料となっている。Al合金は軽量材であるマグネシウムおよびチタンよりも安価であり、かつリサイクルが容易なためプラスチック・樹脂のような産業廃棄物処理の問題はまったくない。しかし、構造材料としてのAl合金の特性にはまだまだいくつもの欠点がある。その一つに、鉄鋼材料に比して耐摩耗性が著しく低く、またこれを改善するための適当な表面硬化処理技術が確立していないことが挙げられる。このため、この分野の技術開発が強く求められてきており、研究が活発化してきている。平成7年には(財)金属系材料研究開発センターよりわが国におけるこの分野の技術開発の現状が、「アルミニウム合金の表面厚膜硬化技術」としてまとめられている。

本報では、Al合金表面に厚さがミリオーダの厚膜硬化層を形成する代表的な方法として、特にプラズマアーク合金化法を取り上げて解説する。

2. Al合金の表面硬化技術の現状

図1はこれまでに公表されたAl合金の表面硬化に関する特許および文献より表面硬化層の硬さと厚さとの関係をそれぞれの表面硬化法とともに表示したものである。両者の関係は「L字形」を示しており、二つのグループに分けることができる。すなわち、一つは硬さは比較的低いものの、厚さはミリオーダの厚膜が容易に得られる方法で

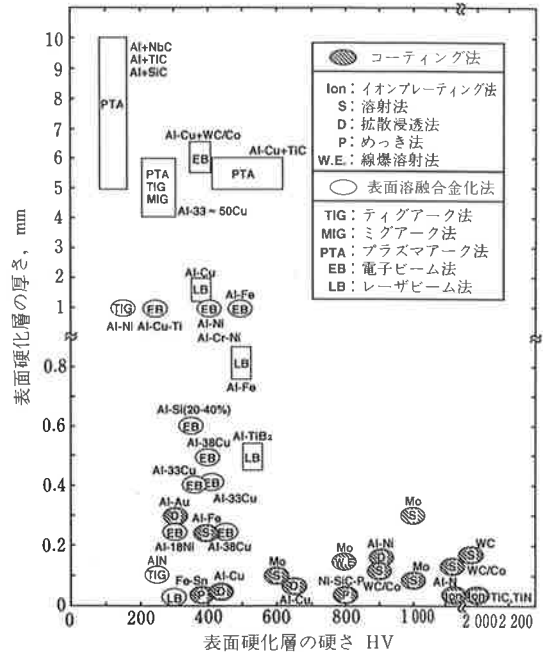


図1 これまでに公表されたAl合金の表面硬化層の硬さと厚さの関係

あり、表面溶融合合金化法に属するものである。これは、Al合金表面を局部的に熔融し、そこに金属やセラミックス粉末などを添加して、合金化・複合化層をその表面に形成する方法である。表面層を局部的に熔融するために、その熱源にはエネルギー密度の大きな溶接用熱源が用いられる。これにはティグアーク (TIG)、ミグアーク (MIG)、プラズマアーク (PTA)、レーザビーム (LB) および電子ビーム (EB) がある。表1に各熱源の特徴を比較して示す。

Thick Surface Hardening Technology for Aluminum Alloy

By Kazuhiro NAKATA, Joining and Welding Research Institute, Osaka University (11-1, Mihogaoka, Ibaraki-shi, Osaka 567)

表 1 表面溶融熱源の特徴

プロセス	パワー密度, W/mm ²	硬化層厚さ	熱影響の程度	硬化物質添加方法	処理雰囲気	装置コスト
ティグアーク (TIG)	~150	10 mm 程度	大	棒・線材 コアードワイヤ	大気圧	100~200 万円
ミグアーク (MIG)	~150	10 mm 程度	大	線材 コアードワイヤ	大気圧	100~200 万円
プラズマアーク (PTA)	~1 000	20 mm 程度	大	棒・線材 粉末材	大気圧	1 000~2 000 万円
電子ビーム (EB)	10 000 以上	10~15 mm 程度	小	棒・線材 (静置法) プリコート	高真空	1~2 億円
レーザービーム (LB)	10 000 以上	数 mm まで	小	棒・線材 粉末材 プリコート	大気圧 (減圧)	1~2 億円

もう一つの方法は厚さは 0.1 mm 前後と薄いものの、硬さは HV 800~1 000 およびそれ以上の高い硬さが得られる方法であり、Al 合金表面に硬質物質をコーティングする技術に属する。溶射 (S) やめっき (P) などがある。前者の表面溶融合金化法では、高い硬さを得るために合金化物質とその組織制御の開発が進められている。また実用的には硬化層の表面を滑らかに仕上げる必要があるために、この面での対策も不可欠である。後者のコーティング法では、厚膜を得るために、成膜速度の迅速化、組織傾斜化などによる残留応力の低減および Al 合金基材の前処理 (下地処理) などによる密着性の改善が今後の検討課題である。

3. プラズマアーク合金化法

3.1 プロセス

すでに表 1 に示したようにプラズマアークのエネルギー密度はティグ・ミグアークよりもかなり大きく、電子ビーム・レーザービームとの中間に位置する。このため、アークよりも基材表面層の溶融深さを制御しやすく、かつ比較的高速度で連続溶融することが可能である。

図 2 に本法の模式図²⁾を示す。プラズマアークにより基材である Al 合金表面層を 20 mm 程度までの深さで局所的に溶融し、同時に粉末供給装置よりプラズマアーク中を通してセラミックスや金属粉末を溶融池内に注入する。このとき、プラ

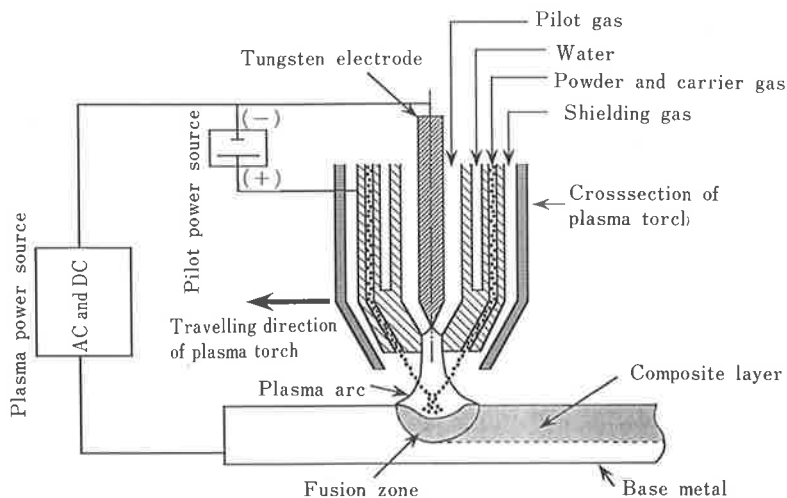


図 2 プラズマアーク合金化法の模式図 [文献 2] より転載]

ズマトーチもしくは基材を移動させることにより
基材表面に厚さが数 mm から 20 mm 程度の複合
化・合金化層を連続的に形成することができる。

3.2 金属粉末添加による合金化層の形成

金属粉末添加では、溶融アルミニウムとの反応
により合金化層を形成し、主として硬質の Al 基
金属間化合物などにより、合金化層の硬さを増加
させる。このため合金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。

各種金属粉末に対して検討した結果、合金化層
の形態は図 3 に示す 4 形態に分類される³⁾。

アルミニウムと共晶反応を有し液相温度も比較
的に低い銅やシリコンでは均一な合金化層が得られ
るが、クロムやチタンのように包晶、偏晶反応を
有し、液相温度の高い金属粉末では、表面に化合
物を形成し、均一な合金化層は得られにくい。ま
た、ニッケルのように包共晶反応を有する場合は
、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合金化層が得られる。

さらに、融点が 3 000℃ 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
混合された状態となる。

図 4 に代表的な合金化層の断面マクロ組織例を

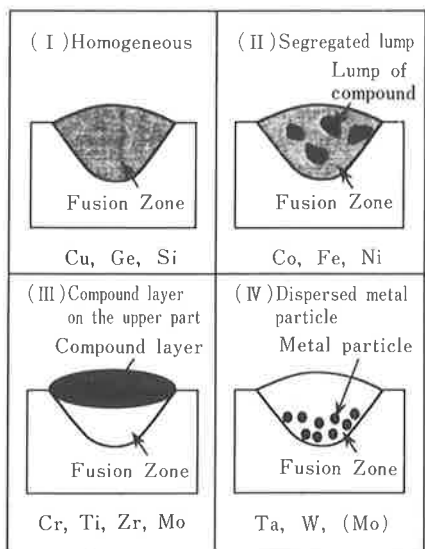
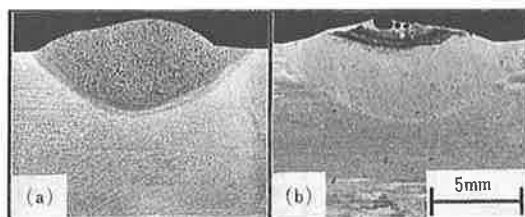


図 3 金属粉末添加合金化層の形態
(断面における組織の模式図)
〔文献 3〕より転載

示す。

図 5 は合金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。これは金
属間化合物の生成量の増加に対応している。しか
し、金属間化合物は本質的に脆い性質を有してい
るために、その生成量が増加し、大きな塊状もし
しくは層状を呈すると、合金化層の冷却中に発生
する引張残留応力に耐えられずに割れが発生する
ことになる。これまでの検討結果より、硬さが
HV 300 以上では、添加元素によらず合金化層に
は割れが発生し、金属添加では硬さの増加には限
界があることが明らかになっている。金属元素の
中では、合金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。これら



(a) シリコン添加 (b) チタン添加

図 4 合金化層断面マクロ組織例

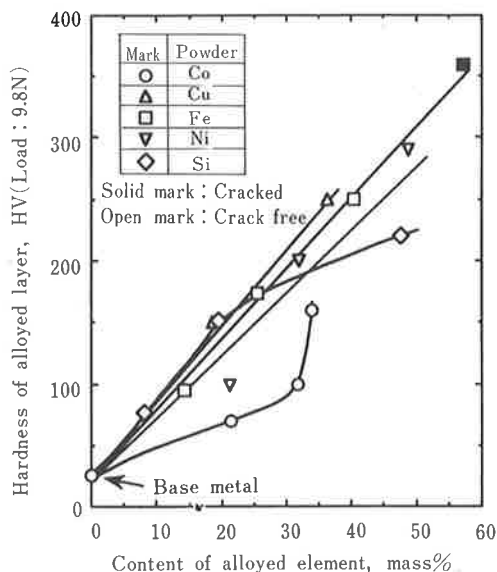


図 5 合金化層硬さに及ぼす各種合金添加量の影響
(基材 A 1070) 〔文献 3〕より転載

の合金化層では硬質粒子である CuAl_2 および Si がアルミニウムマトリックス中に均一に分散するために耐割れ性が優れている。

3.3 セラミックス粉末添加による複合化層の形成

溶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ことができる。図6は複合化層の断面組織の模式図である。著者らがこれまでに検討した炭化物、窒化物、ホウ化物、酸化物、ケイ化物を複合粉末とした複合化層の形態は大略図6のように5種類の基本タイプに分類できる。

これらはセラミックス粒子の融点により I ~ III と IV・V の二つのグループに大別される。セラミックス粒子の融点が約 2500°C 以上では I ~ III、それ以下では IV・V となる。これは高融点セラミックスでは粒子は溶融することなくアルミニウムをマトリックスとする複合化層を形成し、また溶融アルミニウム ($1000\sim 1400^\circ\text{C}$) との反応もほとんど認められないためである。大部分の炭化物はこれに属する。一方、低融点セラミックスでは高温 (約 $6000\sim 10000^\circ\text{C}$) のプラズマアーク中で粒子が溶融し、かつ Cr_3C_2 や TiSi_2 などのようにアルミニウムと反応しやすい粒子では IV のように表面層に主としてアルミナイドより成る化合物層を形成し、また TiO_2 のように反応しにくい粒子では溶融アルミニウムとまったく混合せずに表面にスラグ状に堆積する。またさらに I ~ III のタイプを支配する因子はセラミックス粒子に関するものとプロセス条件に関するものがある。前者に関する因子では (a) 密度、(b) 粒径、(c) 溶融アルミニウムとのぬれ性、(d) 溶融アルミニウムとの反応性などが挙げられる。図7⁴⁾ は代表的な高融点セラミックスである炭化物粒子を用いた場合の複合化層断面のマイクロ組織を示す。また図8⁴⁾ に炭化物粒子分散層の形態に及ぼす粒径と密度の影響を示す。これらの炭化物では (c) および (d) に大きな相違は認められないために、(a) 密度と (b) 粒径によって形態が決まる。

図9は、TiC 粒子複合化層の TiC 体積率と硬さの関係を示す³⁾。両者の関係は粒子分散型の複合則⁵⁾ にほぼ従っており、硬さは TiC 体積率が

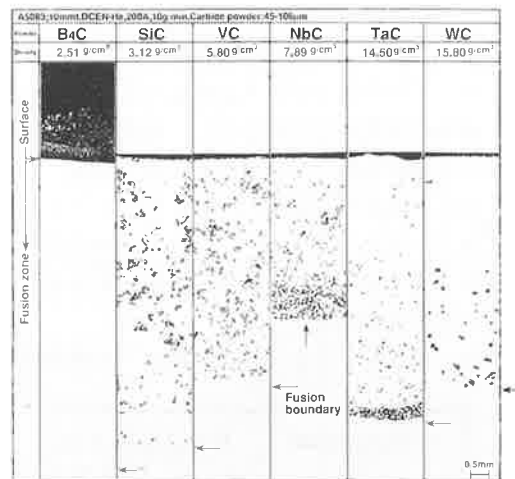


図7 各種炭化物粒子添加複合化層断面のマイクロ組織 [文献4)より転載]

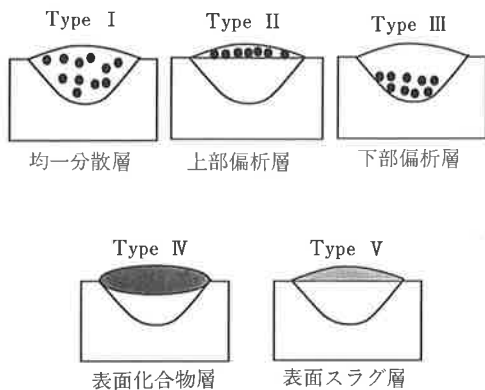


図6 セラミックス粉末添加複合化層の形態 (断面における組織の模式図)

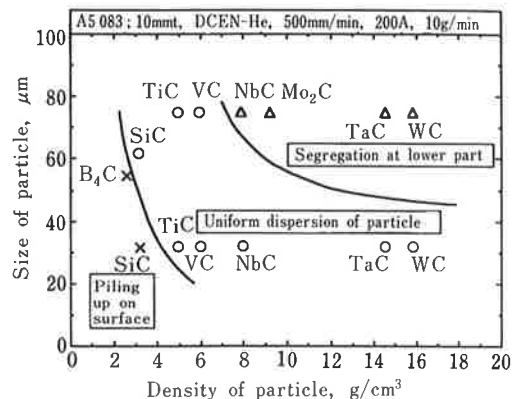


図8 炭化物粒子複合化層内の粒子分散形態に及ぼす粒径と粒子密度の影響 [文献4)より転載]

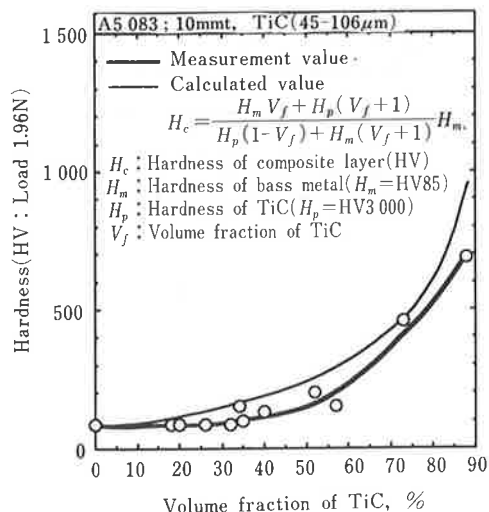


図9 TiC粒子複合化層の粒子体積率と硬さの関係
〔文献3〕より転載

約50%以上において急激に増加する。

3.4 金属-セラミックス同時添加による複合合金化層の形成

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、割れがない状態で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アルミニウム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、アルミニウムマトリックスの強化が必要である。このためには、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、合金化層を形成することによりアルミニウム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。

図10はその代表例として金属として銅、セラミックスとして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⁹⁾。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 (CuAl_2)相と、さらに両者のすきまを 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

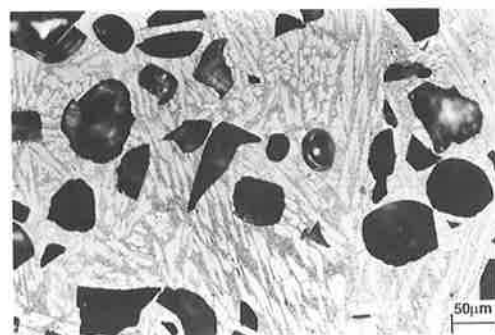


図10 銅+TiC複合添加層のマイクロ組織
(TiC: 黒色粒子, CuAl_2 : 白色粒子, 共晶: 灰色部)

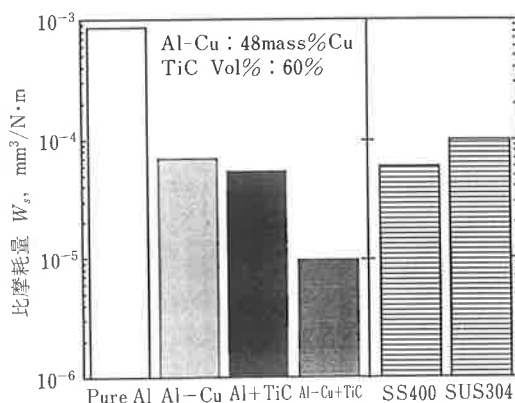


図11 単独添加(銅, TiC)および銅+TiC複合添加層の摩耗量と基材純アルミニウムおよび鉄鋼材料(軟鋼SS400, ステンレス鋼SUS304)との比較(大越式迅速摩耗試験)

さはHV 550に達しており、割れは認められない。図11は、このハイブリッド層の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基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、基材アルミニウムの約100倍以上にまで改善される。

4. 実用化への展開

(財)金属系材料研究開発センターが行なった調査によれば、軽量化のために鉄系製品をアルミ系製品に置き換える過程で厚膜硬化技術が必要とさ

表2 厚膜硬化技術が求められるアルミ系製品 (自動車)

部品	硬化層		その他の特性
	厚さ, mm	硬さ HV	
シリンダヘッド	3~5	200~300	耐熱衝撃性
ピストン	1~2	300~400	耐熱性, 耐食性
ロッカーアーム	0.5以上	500~800	強度, 低摩擦係数
カムシャフト	1以上	700以上	強度, 耐摩耗性
コンロッド	1~2	700以上	強度, 耐摩耗性
エンジン動弁	1以上	700以上	強度, 耐摩耗性
オルダムリング	0.5	200~400	しゅう動特性

れることが多く、たとえば自動車関係では表2¹⁾のようになる。単に耐摩耗性だけではなく、耐焼付き性、潤滑性、耐熱性、耐食性などのいくつかの複合機能が要求される場合が多い。また真空機器や金型のアルミ化に伴い、高面圧、高荷重を受けるフランジ部、ねじ部やあわせ面などの部分的な強化や耐摩耗性の改善、スライド面やしゅう動部の耐凝着性の改善などへの応用が検討されている。図12に一例として厚膜硬化を施したAl合金製フランジを示す。

5. 結 言

Al合金の厚膜表面硬化技術はまだ開発途上の技術であり、具体的な実用化製品の例は少ない。Al合金はこれまで耐摩耗特性や潤滑特性の上での欠点ゆえに製品の設計段階ですでにその適用が除外されてきた。これに対して、本稿がこの技術を応用することにより、新たな表面機能をもった

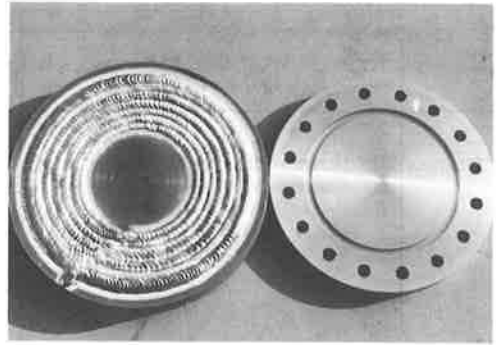


図12 厚膜硬化を施したAl合金製フランジ
(左図：溶融合金化処理のまま、右図：機械加工面)

軽量化材料としてAl合金を再認識して頂ける一助となれば幸いである。本稿で取り上げられなかったプロセスについては参考文献をご参照願いたい。

文 献

- 1) (財)金属系材料研究開発センター編：アルミニウム合金の表面厚膜硬化技術，日刊工業新聞社(1995)。
- 2) 松田福久・中田一博・橋本武典：溶接学会論文集，13，3(1995)395。
- 3) 橋本武典・中田一博・松田福久：溶接技術，44，8(1996)106。
- 4) 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(1993)59。
- 5) I. A. IBARAHIM, F. A. MOHAMED & E. J. LAVERNIA: J. Material Science, 26, 5(1991)1137。
- 6) (財)金属系材料研究開発センター：アルミニウム系新材料の高機能化に関する調査部会報告書(1987)。