

技術解説

抵抗クラディング法によるアルミニウムクラッド材の開発

Development of Aluminum Cladding Material by Resistance Seam Welding



九州工業大学大学院工学研究院
物質工学研究系 准教授
博士 (工学) 山口 富子
Tomiko Yamaguchi



南昌大学
助教
博士 (工学) 王 文琴
Wenqin WANG

1. はじめに

近年の軽量化、省資源、省エネルギー問題に対応することを目的に、車両構体の軽量化においては、アルミニウムの適用が期待されている。しかし、アルミニウムは、耐摩耗性に劣り、摺動部への適用が阻まれている。近年、硬質材料の肉盛溶接が行なわれるが、施工時の熱源にアーク、プラズマアーク及びレーザー等を用いるため、基材への熱的影響が大きく、薄いアルミニウム合金母材への適用は困難である。一方、PVD 及び CVD などの表面改質方法を用いると、薄いアルミニウム合金母材への適用ができる。しかし、形成した耐摩耗層は 10~100 μm であることから、高負荷また長期摩耗を受けた場合に耐摩耗層は完全に破壊されやすい。そこで、薄いアルミニウム合金母材に熱影響が少ない、厚いクラッド層を形成する効率的な方法を開発する必要がある。

本稿では、基材に熱的影響を大きく与えない抵抗クラディング法による厚さ 2mm の A6061 合金薄板上に厚い耐摩耗層の形成並びに形成したクラッド層の諸特性について紹介する。

2. 抵抗クラディング法の原理

板材溶接に抵抗溶接法の一つであるシーム溶接法が使われる。図 1 に示す重ねシーム溶接は、被溶接材を重ね、円盤電極によって加圧と回転によって被溶接材を移動させ、連続的に直接高電流を流し、その電流及び板間接触面における接触抵抗と固有

抵抗による抵抗発熱により加熱、溶融させて被溶接材を接合する。発生する抵抗発熱(ジュール発熱)量 Q (J) は式(1)で表される。

$$Q = I^2 R t \quad (1)$$

ここで、 R (Ω) は金属材料の抵抗、 I (A) は流れた電流、 t (s) は通電時間である。

溶接電流は高く、抵抗は大きく、溶接時間は長い方が抵抗発熱量は大きい。溶接時間が長い、つまり溶接速度は遅い方が、抵抗発熱量が大きい。また、抵抗 R の中には、接触抵抗も含まれ、この値が最も大きい。

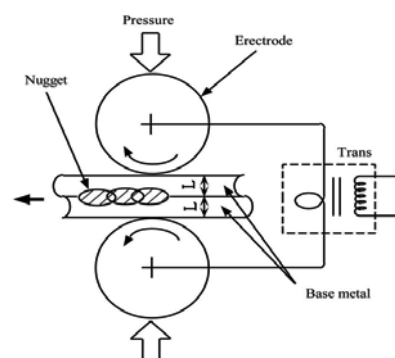


図 1 重ねシーム溶接の概略

耐摩耗層の原料である高炭素鋼及び硬質材料に熱的影響を極力与えない方法として、抵抗溶接方法を用いたクラディング法を検討した。抵抗クラディング法はシーム溶接機を用いて、ジュール熱により粉末層内の低融点物質を溶融凝固させてクラッド層を形成する方法である。

3. 高炭素鋼を内在するクラッド層のミクロ組織及び耐摩耗特性

良好な耐酸化性及び耐食性を有している高炭素鋼 SHA を耐摩耗粉末として採用した。基材に板厚 2、幅 30 及び長さ 150mm の Al-Mg-Si 系合金 A6061、耐摩耗粉末に粒径 63~90 μm の高炭素鋼 SHA を使用した。表 1 及び 2 にそれらの化学組成、図 2 に SHA 粉末の SEM 像を示す。

表 1 使用した A6061 の化学組成(mass%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.6	0.18	0.34	0.03	1.18	0.11	0.02	0.03	Bal.

表 2 使用した SHA の化学組成 (mass%)

C	Si	Cr	Mo	Ni
4.99	0.99	9.84	4.92	4.83

SHA 粉末を A6061 の上に幅 3、長さ 50 及び高さ 0.8mm の形状に形成した後、エタノールで 10 倍に希釈した接着剤を噴霧し、室温で乾燥させた。溶接を行う際に、電極保護のため粉末層の上に箔厚 100 μm の SUS304 を載せ、ナストーア (株) 製の単相交流定置式小型シーム溶接機 RH-8S を用いて、抵抗クラディング溶接を行った結果、基材 A6061 上に厚さ 400~450 μm のクラッド層が形成できた。

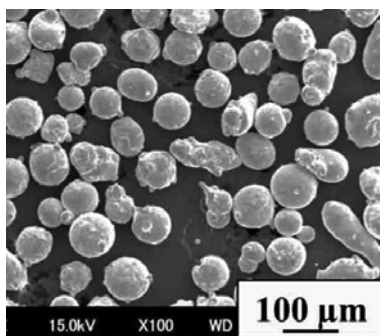


図 2 SHA 粉末の SEM 像

図 3 に SHA 粉末を使用したクラッド層の横断面の macroscale 組織を示す。クラッド層内において、基材の Al が SHA 粒子間に毛細管現象のようにクラッド層上部まで浸入し、金属間化合物 FeAl_3 及び Fe_2Al_5 を生成していた。クラッド層横断面の深さ方向の平均

硬さは 600~690HV であり、基材の硬さ約 70HV と比較し、最大 10 倍に向上した。図 4 に曲げ試験後のクラッド層の外観及び長手方向の断面の macroscale 組織を示す。クラッド層の長手方向に対し垂直に割れが生じていたが、クラッド層が剥離したり、基材から浮き上がったりすることは観察されず、基材と良好に接合していることが分かる。ボール・オン・ディスク摩耗試験により、クラッド層の耐摩耗性は基材と比較し最大 83 倍に向上し、耐摩耗性の改善が認められた。



図 3 クラッド層の横断面の macroscale 組織



(a) 上部から見た外観



(b) 長手方向断面の macroscale 組織

図 4 クラッド層の曲げ試験結果

4. 超硬合金を内在するクラッド層のミクロ組織及び耐摩耗特性

さらに、耐摩耗性の向上のため、耐摩耗粉末として SHA 粉末より硬い超硬合金 WC を使用した。超硬合金は、硬度、強度及び弾性係数が高く、耐摩耗性及び耐食性に優れているため、高い耐摩耗性を必要とする機械部品の広い分野で使用されている^{1~5)}。そして、コストも安価な Fe 基合金⁶⁾の高炭素鋼 SHA を WC 粉末のバインダーとして使用した。

図 5 に使用した WC 粉末(45~75 μm)の SEM 像を示す。SHA 粉末 ($\phi 63 \sim 90\mu\text{m}$) 及び WC 粉末 3:7(mass%)の混合粉末を A6061 の上に幅 5、長さ 50 及び高さ 0.8mm の形状に形成した。その後 3. と

同様の手順で、抵抗クラディング溶接を行った結果、基材 A6061 上に厚さ約 600 μm のクラッド層が形成できた。

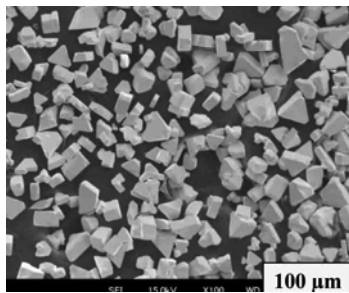


図 5 WC 粉末(45~75 μm)の SEM 像

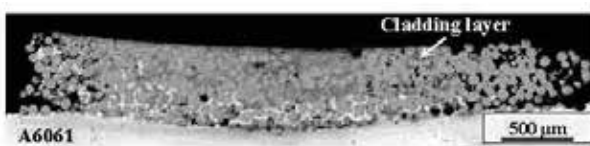


図 6 クラッド層の横断面のマクロ組織

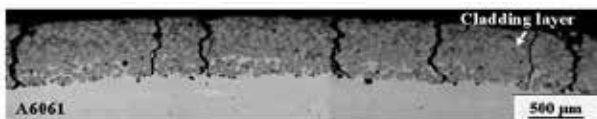
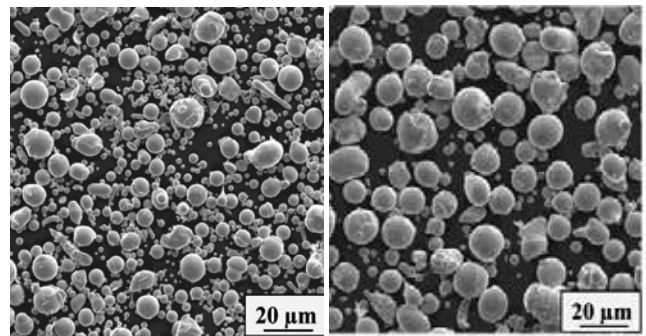


図 7 曲げ試験後の長手方向断面マクロ組織

図 6 に WC+SHA 粉末を使用したクラッド層の横断面のマクロ組織を示す。クラッド層内には針状の金属間化合物 FeAl_3 が生成していた。クラッド層の平均硬さは基材と比較して約 11 倍に増大した。図 7 に曲げ試験後のクラッド層の長手方向断面のマクロ組織を示す。クラッド層と基材の接合性は良好である。ボール・オン・ディスク摩耗試験により、SHA 粉末のみを使用したクラッド層の耐摩耗性と比較して、WC+SHA 粉末を使用したクラッド層の耐摩耗性は、最大 3.0 倍に向上し、耐摩耗性の改善が認められた。摩耗はクラッド層内の A6061 組織の剥離によって生じていることが分かった。

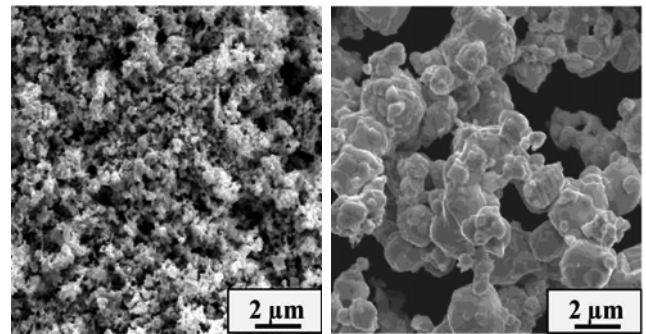
5. 超硬合金を内在する複合クラッド層のミクロ組織及び耐摩耗特性

界面接合性の向上と耐摩耗性向上のために、高炭素鋼粉末そして WC 粉末と高炭素鋼粉末の混合粉末を積層して複合クラッド層を作製した。表層に WC 粉末と高炭素鋼粉末の混合粉末、下層に高炭素鋼粉末のみを使用した。



(a) 10~20 μm SHA

(b) 32~45 μm SHA



(c) ナノ WC

(d) 3.79 μm WC

図 8 使用した SHA 粉末及び WC 粉末の SEM 像

粒径 32~45 μm の SHA 粉末を A6061 の上に幅 3、長さ 50 及び高さ 0.5mm の形状に形成し、その上に WC 粉末 (粒径 0.08、3.79 及び 45~75 μm) 及び SHA 粉末 (粒径 10~20 μm) を 3:7 (mass%) の混合粉末を高さ 0.8mm に塗布した。その後 3. と同様の手順で、抵抗クラディング溶接を行った。図 8 に使用した粒径の異なる SHA 粉末及び WC 粉末の SEM 像を示す。

図 9 に作製したナノ WC、微細 WC 及び粗粒 WC を内在する複合クラッド層の横断面のマクロ組織を示す。複合クラッド層の表層の厚さは 250~300 μm 、下層の厚さは約 200 μm である。複合クラッド層と基材 A6061 の界面に気孔などの欠陥は認められず、接合性は良好であった。

ナノ WC を内在する複合クラッド層の表層はナノ WC 粒子が粒径 10~20 μm の SHA 組織に囲まれる混合組織と一部溶解した SHA 粒子の 2 組織で構成されていた。微細 WC 及び粗粒 WC を内在する複合クラッド層の表層では完全溶解した 10~20 μm の SHA 粒子及び WC 粒子の 2 組織で構成された。

ナノ WC 及び微細 WC を内在する複合クラッド層の表面における硬さ分布は均一で、平均するとそれぞれ 1000 及び 1022HV となった。粗粒 WC の場合

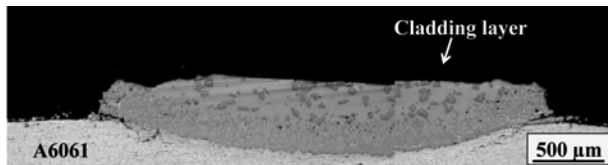
は硬さ分布にばらつきが見られ、最高値の 1320HV は粗粒 WC 粒子の領域、最低値の 840HV は SHA 組織の領域の硬さを測定したものと考えられる。これにより、いずれの試料においても複合クラッド層の表面の硬さは大きな差異が見られず、基材と比較すると約 14 倍に増加した。



(a) ナノWC



(b) 微細WC



(c) 粗粒WC

図9 複合クラッド層の横断面のマクロ組織

複合クラッド層の横断面の硬さ分布から、いずれの試料においても、複合クラッド層の表層において硬さのばらつきは小さく、ほぼ均一に分布し、平均するとそれぞれ 1020、1098 及び 1015HV となった。これは表層を構成している組織が WC 粒子及び SHA 組織であることから、硬さの値はこの 2 つの中間の値と考えられる。複合クラッド層の下層においては基材に近づくにつれて、硬さは急激に低下し、硬さ分布にもばらつきが見られ、平均するとそれぞれ約 881、868 及び 803HV となった。以上のことから、複合クラッド層横断面の表層の最大硬さは 1100HV、基材と比較すると最大 16 倍に増加し、4. の 30% WC-SHA のクラッド層と比較すると最大 400HV に向上した。

ボール・オン・ディスク摩耗試験を行った結果、30%WC-SHA のクラッド層の耐摩耗性と比較して最大 5 倍に向上し、耐摩耗性の改善が認められた。また、WC 粒径が小さくなるにつれて、複合クラッド層の耐摩耗性の改善が増加した。クラッド層の 3D-SEM 像により摩耗痕は見られず、複合クラッド

層の表面は凹凸がない状態を呈していた。それぞれの条件で形成したクラッド層の摩耗痕の変位検出線から、30% WC-SHA のクラッド層の摩耗痕の変位検出線と比べて、複合クラッド層の摩耗痕の変位は小さい。また、WC 粒子の粒径が大きくなるにつれて、複合クラッド層の摩耗痕の変位は大きくなり、ナノ WC を内在する複合クラッド層の摩耗痕の変位は最も小さいことから、ナノ WC を内在する複合クラッド層の耐摩耗性は最も優れていることが分かった。

6. まとめ

基材に熱的影響を大きく与えない抵抗クラディング法により、アルミニウム合金 A6061 薄板上への厚い耐摩耗層の形成法の開発、並びにクラッド層の特性に及ぼす各種の硬質材料並びに粒径の影響について紹介した。

参考文献

1. J. S. Xu, X. C. Zhang, F. Z. Xuan, F. Q. Tian, Z. D. and Wang, S. T. Tu: Tensile properties and fracture behavior of laser cladded WC/Ni composite coatings with different contents of WC particle studied by in-situ tensile testing. *Mater. Sci. Eng. A560* (2013), pp744-751.
2. A. K. Basak, J.-P. Celis, M. Vardavoulias and P. Matteazzi: Effect of nanostructuring and Al alloying on friction and wear behaviour of thermal sprayed WC-Co coatings. *Surf. Coat. Technol.* 206 (2012), pp3508-3516.
3. X. Q. Zhao, H. D. Zhou and J. M. Chen: Comparative study of the friction and wear behavior of plasma sprayed conventional and nanostructured WC-12%Co coatings on stainless steel. *Mater. Sci. Eng. A* 431 (2006), pp290-297.
4. X. Tong, F. H. Li, M. Kuang, W. Y. Ma, X. C. Chen and M. Liu: Effects of WC particle size on the wear resistance of laser surface alloyed medium carbon steel. *Appl. Surf. Sci.*, 258 (2012), pp3214-3220.
5. L. He, Y. F. Tan, X. L. Wang, H. Tan and C. H. Zhou: Tribological properties of WC and CeO₂ particles reinforced in-situ synthesized NiAl matrix composite coatings at elevated temperature. *Surf. Coat. Technol.* 244 (2014), pp123-130.
6. A. Farid and S. J. Guo: On the processing, microstructure, mechanical and wear properties of cermet/stainless steel layer composites. *Acta Materialia.* 55 (2007), pp1467-1477.